

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA
E ENERGIA



LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA

**Elaboração de uma Carta de Aterros da Cidade de Lisboa por
LiDAR e Fotogrametria Aérea**

PEDRO MIGUEL RUSSO DE CARVALHO DIAS

DISSERTAÇÃO

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOGRÁFICA

2013

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA
E ENERGIA



**Elaboração de uma Carta de Aterros da Cidade de Lisboa por
LiDAR e Fotogrametria Aérea**

Pedro Miguel Russo de Carvalho Dias

Dissertação orientada pela Professora Doutora Paula Redweik

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOGRÁFICA

2013

*Para os meus avós:
Custódia, Filipe, Jacinta e António,
verdadeiros alicerces de uma família.
Ontem, hoje e sempre uma referência.*

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas	viii
Índice de Gráficos	ix
Lista de Acrónimos	x
Resumo	xiii
Abstract	xiv
Agradecimentos	xv
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.1.1 Áreas de instabilidade de vertentes	1
1.1.2 Principais causas de ocorrência de movimentos de massa em vertentes	3
1.1.3 Ordenamento do território na prevenção de riscos naturais de movimentos de massa em vertentes.....	4
1.1.4 Actualização da cartografia geológica oficial.....	7
1.1.5 Definição de Modelo Digital de Elevação	9
1.1.6 Métodos de recolha de amostras primárias	11
1.2 Objectivos.....	13
1.3 Área de estudo	15
1.4 Fonte de dados.....	16
1.4.1 Fotografias aéreas.....	16
1.4.2 Dados LiDAR.....	17
1.5 Organização do trabalho.....	18
2 Modelo digital do terreno a partir de dados LIDAR.....	20
2.1 Revisão de Algoritmos de filtragem de dados LIDAR.....	21
2.1.1 Filtro Morfológico	21
2.1.2 Filtro por densificação progressiva	23
2.1.3 Filtro baseado em superfícies	23

2.1.4	Filtro baseado em segmentação	24
2.1.5	Comparação entre algoritmos de filtragem	24
2.1.6	Reconstrução morfológica baseada em dilatações geodésicas sucessivas	25
2.2	Técnicas de extracção de edifícios	30
2.2.1	Filtro <i>passa-baixa</i>	31
2.2.2	Filtro <i>passa alta</i>	32
2.3	Técnicas de interpolação	35
2.4	Técnicas de avaliação da qualidade do MDT LiDAR.....	36
2.5	<i>Software</i> MATLAB®.....	37
2.6	Execução e resultados.....	38
2.6.1	Algoritmo sem extracção à priori de edifícios	38
2.6.2	Algoritmo com extracção à priori de edifícios	43
2.6.3	Aplicação do algoritmo à área de estudo	48
2.6.4	Avaliação da qualidade dos resultados.....	51
3	Modelo digital do terreno a partir de fotografia aérea	56
3.1	Aquisição amostra primária.....	56
3.1.1	O processo de correspondência automática de imagens.....	56
3.1.2	Orientação fotogramétrica	62
3.1.3	<i>Software</i> PHOTOMOD.....	69
3.1.4	Execução e resultados	71
3.2	Interpolação da amostra primária.....	86
3.2.1	Técnicas de interpolação	87
3.2.2	Análise de resultados das técnicas de interpolação	90
3.2.3	<i>Software</i> ARCGIS.....	90
3.2.4	Execução e resultados	91
4	Comparação de MDT.....	96
4.1	Transformação para sistema de coordenadas comum.....	96
4.2	Mapa de aterros e escavações	97

4.3	Identificação dos principais erros.....	98
4.3.1	Zonas de aterros.....	99
4.3.2	Zonas de escavações.....	100
4.4	Validação de resultados.....	104
5	Conclusões.....	106
	Referências	110
	Anexo A – Perfil do concelho de Lisboa: Cheias/inundações e movimentos de massa em vertentes, período 1865-2010.	1

Índice de Figuras

Figura 1 – Carta de susceptibilidade de ocorrência de movimentos de vertente	7
Figura 2 – Exemplo de identificação de aterros com recurso a fotointerpretação.....	8
Figura 3 – Carta de geológica do concelho de Lisboa actualizada.....	9
Figura 4 – Diferenças entre o MDS (a azul) e o MDT (a vermelho).....	10
Figura 5 – Componentes do sistema LiDAR	12
Figura 6 – Área de estudo.....	15
Figura 7 – Fotografias usadas com respectivas OE	17
Figura 8 – MDS LiDAR original	18
Figura 9 – Morfologia Matemática: As zonas a azul claro representam os resultados das operações do EE de forma circular, nos quadrados azuis-escuros.	22
Figura 10 – Conceito da reconstrução morfológica por dilatações geodésicas sucessivas	27
Figura 11 – Diferenças nos resultados de TopHat, entre a morfologia clássica (imagem central) e a morfologia geodésica (imagem inferior).....	28
Figura 12 – Algoritmo implementado	30
Figura 13 – Diferenças entre o filtros passa-baixas: imagem da esquerda é a original, a do centro é o resultado do filtro gaussiano e a da direita o resultado do filtro da média.	32
Figura 14 – Diferenças entre filtros derivativos de 1ª ordem e de 2ª ordem	34
Figura 15 – Os pontos vermelhos são pontos de coordenadas conhecidas e o ponto verde é o ponto que se pretende interpolar.....	36
Figura 16 – Área de testes do algoritmo de classificação dos dados LiDAR	38
Figura 17– Regiões classificadas como “não terreno” a azul, utilizando diferentes imagens marcador (J) no algoritmo. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: J=I-2; J=I-6; J=I-10; J=I-14.....	40
Figura 18 – Esquerda: Imagem do MDS normalizado (nMDS); Centro: Regiões formadas por conectividade dos pontos “não terreno”, obtidas após binarização do nMDS; Direita: Identificação da fronteira de cada região.....	41
Figura 19 – Regiões classificadas como “não terreno”, a branco (esq.) e a azul (dir.) para um marcador com offset=2m.	42

Figura 20 – Esquerda: Regiões classificadas como “não terreno” no final; Centro: Imagem original; Direita: MDT produzido.	43
Figura 21 – Algoritmo proposto para detectar edifícios	44
Figura 22 – Esquerda: Resultados com filtro gaussiano 2D configurado por defeito; Direita: Resultados com filtro gaussiano 2D com as opções: <i>hsize</i> [13 13] e <i>sigma</i> =2.	45
Figura 23 – Esquerda: Resultados da função <i>edge</i> ; Centro: Resultados da função <i>edge</i> com contornos fechados; Direita: Regiões formadas pelos limites da função <i>edge</i>	46
Figura 24 – Esquerda: Erros no 1ºMDT provisório; Centro: Identificação dos erros do 1ºMDT provisório; Direita: 2ºMDT provisório.....	47
Figura 25 – Esquerdo: Regiões classificadas como “não terreno” da 3ª fase; Direito: MDT LiDAR final da área de testes.....	47
Figura 26 – Esquerdo: Falhas de classificação do algoritmo de reconstrução morfológica por dilatações geodésicas sucessivas; Direito: Falhas de classificação no algoritmo melhorado.	48
Figura 27 – MDT LiDAR final para a área de estudo.....	49
Figura 28 – Pixéis classificados com “não terreno” da área de estudo.....	50
Figura 29 – Localização de pontos de controlo GNSS.....	52
Figura 30 – Diferenças entre o MDT LiDAR e o MDT IGeoE.....	54
Figura 31 – Diferenças entre o MDT LiDAR e o MDT IGeoE: a) tuneis e edifício; b) Passagem superior e viaduto; c) Topo de elevação e passagem superior; d) Terreno com grande declive.....	55
Figura 32 – Maior Diferença entre o MDT LiDAR e o MDT IGeoE: Estrutura não extraída.....	55
Figura 33 – Percepção a 3D.	58
Figura 34 – Determinar a altura de um ponto no terreno.....	59
Figura 35 – Correspondência por áreas.....	60
Figura 36 – Pirâmide de imagens.	62
Figura 37 – Feixes perspectivados.	66
Figura 38 – Limite de pontos da versão <i>lite</i> do Photomod®.	70
Figura 39 – Parâmetros de configuração da câmara.....	71

Figura 40 – <i>Block Layout</i>	71
Figura 41 – Parâmetros do <i>correlator</i>	73
Figura 42 – Resultados de alguns pontos obtidos na 1ª tentativa.	75
Figura 43 – Medição manual de marcas fiduciais das fotografias.	76
Figura 44 – Critério de busca de pontos conspícuos.....	77
Figura 45 – Figura com “ <i>tie points</i> ” medidos	77
Figura 46 – Planeamento de Pontos Fotogramétricos	79
Figura 47 – PF: Planeamento em gabinete, levantamento no terreno e medição no Photomod®.....	81
Figura 48 – Dificuldade em marcar o PF101 no Photomod®.	81
Figura 49 – Nova configuração para a ATA	82
Figura 50 – Bloco ajustado pela 4ª tentativa e pontos cotados da zona do Terreiro do Paço.	83
Figura 51 – Amostra primária de pontos.	84
Figura 52 – Parâmetros do filtro: “ <i>Filter of buildings and vegetation</i> ”	85
Figura 53 – Processo de filtragem e completamento: a) Nuvem de pontos original; b) Selecção de uma área de trabalho; c) pontos amarelos: resultado da filtragem com o filtro automático; d) pontos vermelhos: completamento de lacunas.	86
Figura 54 – Representação gráfica da função variograma	89
Figura 55 – IDW: Pontos utilizados para determinar o valor da localização assinalada como uma cruz e os respectivos pesos.	92
Figura 56 – Análise da normalidade dos dados: Análise de tendências.	92
Figura 57 – Análise de existência de efeitos direccionais nos dados: a) variograma; b) isotropia; c) anisotropia.....	93
Figura 58 – MDT Foto.....	95
Figura 59 – Mapa de aterros e escavações.	98
Figura 60 – Erros nas zonas de aterros.	100
Figura 61 – Erros nas zonas de escavações.....	102
Figura 62 – Carta de declives da área de estudo calculada com base no MDT IGeoE.	103

Figura 63 – Carta de declives da área de estudo e zonas de escavação identificadas. Estudo comparativo com zonas urbanizadas em 1944.	103
Figura 64 – Validação de carta de aterros e escavações com estudo baseado na fotointerpretação.	104
Figura 65 – Carta de aterros e escavações para $\sigma = 1.54$ m.	105

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Diferentes imagens marcadores utilizados.	39
Tabela 2 – Precisão obtida no VG Poiais.	51
Tabela 3 – Avaliação quantitativa da qualidade geral.	52
Tabela 4 – Principais configurações utilizadas no algoritmo “ <i>compute points automatic</i> ”	75
Tabela 5 – Resultados ATA, 2ª abordagem.	78
Tabela 6 – Resultados obtidos nos dois pontos de controlo.....	79
Tabela 7 – Parâmetros de transformação de coordenadas, Datum WGS84 para Datum Lisboa.....	80
Tabela 8 – Valores de referência da DGT para a transformação de coordenadas [IGEO, 2013].....	80
Tabela 9 – Resíduo registado no ponto de controlo Poiais, após calibração local.....	80
Tabela 10 – Resultados ATA, 3ª abordagem.	82
Tabela 11 – Resultados ATA, 4ª abordagem.	82
Tabela 12 – Testes com interpoladores espaciais.....	94
Tabela 13 – Precisão de transformação pelo método das grelhas [DGT, 2013].....	96

Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Gráfico com frequência acumulada de registos de cheias/inundações e movimentos de massas em vertentes no concelho de Lisboa, para o período 1865-2010.	2
---	---

Lista de Acrónimos

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

AML – Área Metropolitana de Lisboa

ATA- Aerotriângulação Automática

CCDR-LVT - Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo

DGT – Direcção Geral do Território

DL – Decreto-Lei

EE – Elemento Estruturante

ETRS89 – *European Terrestrial Reference System* 1989

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

FCG – Fundação Calouste Gulbenkian

FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia

FEDER – Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

GPS - *Global Positioning System*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

IDW – *Inverse Distance Weight*

IGeoE – Instituto Geográfico do Exército

IGT – Instrumentos de Gestão Territorial

IMU – *Inertial Measurement Unit*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

LOG – Operador Laplaciano do Gaussiano

MATLAB – *MATrix LABoratory*

Mb – Matriz de Busca

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Tereno

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

Mp – Matriz Padrão

nMDS – Modelo Digital de Superfície normalizado

OE – Orientação Externa

OI – Orientação Interna

OR – Orientação Relativa

PDI – Processamento Digital de Imagem

PF – Ponto Fotogramétrico

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

POOC – Planos de Ordenamento de Orla Costeira

PDM – Plano Director Municipal

RAM - *Random Access Memory*

RENEP - Rede Nacional de Estações Permanentes

RGN – Rede Geodésica Nacional

RM – Reconstrução Morfológica

RMS – *Root Mean Square* ou Erro Médio Quadrático

RTK – *Real-Time Kinematic*

SERVIR - Sistema de Estações de Referência GNSS Virtuais

SPAL – Sociedade Portuguesa de Levantamentos Aéreos Limitada

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mapping*

TIN – *Triangular Irregular Network*

VG – *Vértice Geodésico*

WGS84 – *World Geodetic System 1984*

Resumo

A carta de aterros e escavações é um importante contributo para a produção de cartografia de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente. Nesta dissertação foi testada uma metodologia com vista a identificar e cartografar de forma precisa as zonas de aterros e escavações da cidade de Lisboa, com base num Modelo Digital de Terreno (MDT) produzido a partir de dados LiDAR de 2006 e de um MDT obtido a partir de fotografias aéreas antigas datadas de 1944, de forma automática e independente da escala das fotografias.

Nos últimos anos foram propostos vários métodos para gerar um MDT a partir do Modelo Digital de Superfície (MDS) fornecido por sensores LiDAR. Neste trabalho, é apresentado uma técnica que se baseia na reconstrução morfológica por dilatações geodésicas sucessivas, complementada com uma extracção prévia dos edifícios, o que permitiu melhorar a qualidade do MDT.

Para se produzir o MDT a partir de fotografias, primeiro recuperaram-se as orientações das fotografias através da técnica da aerotriangulação e depois utilizou-se o método da correlação automática de imagens, cujo algoritmo se baseia no coeficiente de correlação cruzado, para gerar a nuvem de pontos 3D da superfície terrestre.

A técnica de interpolação que melhores resultados produziu na elaboração do MDS foi o kriging ordinário. Posteriormente, a filtragem dos pontos não terreno foi realizada através de uma função disponibilizada pelo *software Photomod* e que se baseia no ângulo de declive máximo entre dois pontos. Esta filtragem demonstrou lacunas, principalmente em zonas urbanizadas com declive acentuado.

Da análise entre os dois MDT, elaborou-se um mapa de aterros e escavações preciso onde cada pixel representa o volume de solos alterado em 62 anos. Estes resultados foram validados com um levantamento realizado por fotointerpretação, sendo possível concluir que, para uma incerteza de 1,54 m, as zonas de aterro e escavação correspondem com o levantamento efectuado manualmente.

Esta metodologia demonstrou ser de difícil implementação para áreas de grandes dimensões, uma vez que o tempo de processamento do algoritmo necessário para gerar o MDT a partir de dados LiDAR, excedeu os 65 dias.

Abstract

The landfills and excavations cartography is an important contribution for the landslides susceptibility mapping. In the present work, an approach is tested to identify and map landfills and excavations zones in Lisbon County, based on a Digital Terrain Model (DTM) produced from 2006 airborne LiDAR data and a DTM obtained from old aerial photographs dated from 1944, automatically and independent from the photographs scale.

During the past few years, several methods have been proposed for DTM generation from LiDAR Digital Surface Model (DSM) data. In this work, a technique based on morphological reconstruction by successive geodesic dilations is proposed, complemented with a prior extraction of buildings, which has improved the quality of DTM.

To generate DTM from photographs, first was necessary recover the photos orientations with the aerial triangulation technique, and then was used the auto-correlation method for pictures whose algorithm is based on cross-correlation coefficient to generate the 3D point cloud from the earth's surface.

The interpolation technique that produced the best results in the development of DSM was ordinary kriging. Subsequently, the filtering of non-ground points was performed using a function provided by the *Photomod software* which is based on the angle of maximum slope between two points. This filtering showed lower performance, especially in urbanized areas with steep slopes.

Analysis between the two DTM, allow precise landfills and excavations cartography where each pixel represents the volume of soil changed in 62 years. This results was validated through a survey produced by photo interpretation, where it is possible to conclude that, for an uncertainty of 1.54 m, the excavation and landfills areas correspond to the survey carried out manually.

This methodology proved to be difficult to implement in large areas, since the processing time that the algorithm needed to generate the DTM from LiDAR data, exceeded 65 days.

Agradecimentos

Ao curso General Bernardo Faria e Silva, onde a força do carácter, amizade e camaradagem foram forjadas e onde jamais serão esquecidas.

Aos Artilheiros, irmãos de armas de outras batalhas. Nunca como hoje o nosso lema fez tanto sentido...Esta é também uma vitória vossa.

À Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, nomeadamente ao corpo Docente do Curso de Engenharia Geográfica sem excepção: Professora Ana Navarro, Carlos Antunes, Cristina Catita, Fernando Soares, João Calvão, João Catalão Fernandes, Paula Redweik e Virgílio Mendes. Foi um privilégio ter sido instruído por vós. Espero estar à altura das vossas expectativas e poder contribuir para o prestígio do nosso curso!

À Professora Paula Redweik por ter aceite a orientação da minha tese de mestrado e por toda a dedicação, paciência e interesse demonstrado ao longo de todos estes anos.

Ao Major Rui Teodoro e Nuno Mira pelo apoio inexcedível que a Secção de Topografia do Instituto Geográfico do Exército sempre colocou ao nosso dispor.

Ao Tenente-Coronel Rui Dias pelo acompanhamento, aconselhamento e revisão que gentilmente efectuou à minha dissertação.

Ao António Marques e Manuel Vasconcelos pela informação que disponibilizaram.

A todos os colegas que comigo partilharam estes 4 anos. Foram momentos inesquecíveis. A todos o meu obrigado.

Aos meus pais e mana por...tudo.

À Sónia, colega, camarada, amiga e companheira. Foste a minha força neste projecto. Obrigado por todos os momentos de paciência, por todas as palavras de conforto e encorajamento, por todos os sucessos que festejaste a meu lado.

1 Introdução

A elaboração da carta de aterros da cidade de Lisboa justifica-se pela necessidade de se estudar e identificar zonas particularmente vulneráveis à ocorrência do fenómeno de instabilidade de vertentes.

A introdução ao tema desta dissertação é efectuada na secção 1.1, onde se justifica a relevância do seu estudo, todo o enquadramento legal a ele associado e os trabalhos já desenvolvidos nessa área. São também apresentados nessa secção os conceitos e fundamentos inerentes aos Modelo Digitais de Elevação (MDE).

Na secção 1.2 são definidos os objectivos principais e específicos que nortearam todo o trabalho desenvolvido. Na secção 1.3 e 1.4 são caracterizadas a área de estudo e as principais fontes de dados utilizadas. Por último, na secção 1.5, são apresentadas a estrutura e a organização da tese.

1.1 Enquadramento

Nesta secção é apresentada, numa 1ª fase, a forma como é determinada a susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertentes, definindo-se as áreas de instabilidade (1.1.1), as suas principais causas (1.1.2), a legislação de ordenamento do território que enquadra esses riscos, a forma como são delimitadas, as limitações identificadas nessa cartografia de risco (1.1.3) e os trabalhos já desenvolvidos para as minimizar (1.1.4). Numa 2ª fase é apresentada a definição de MDE, as várias designações existentes e as suas aplicações (1.1.5). Por último são introduzidos os vários métodos de recolha de amostras primárias necessários para se produzir um MDE.

1.1.1 Áreas de instabilidade de vertentes

A definição de áreas de instabilidade de vertentes, segundo a alínea e, da secção III, do anexo 1 do Decreto-lei (DL) n.º 166/2008, é a seguinte: “são as áreas que, devido às suas características de solo e subsolo, declive, dimensão e forma da vertente ou escarpa e condições hidrogeológicas, estão sujeitas à ocorrência de movimentos de massa em vertentes, incluindo os deslizamentos, os desabamentos e a queda de blocos. (...) Na delimitação de áreas de instabilidade de vertentes devem considerar-se as suas características geológicas, geomorfológicas e climáticas.”

Segundo Mateus [2008], em Portugal existem zonas particularmente vulneráveis à ocorrência deste fenómeno de instabilidade de vertente, nomeadamente em regiões graníticas a norte do país, no vale do Douro devido ao relevo acentuado, na região a norte de Lisboa e Santarém devido às deficientes características de resistência dos terrenos e pontualmente nas arribas litorais onde o fenómeno de erosão no sopé é extremamente intenso.

O fenómeno de instabilidade em vertentes caracteriza-se por ter uma “escala muito variada” que pode ir desde a queda de pequenos blocos em escarpas com poucos decímetros cúbicos até movimentos de solos consideráveis envolvendo “milhões de metros cúbicos”, provocando enormes perdas humanas e materiais Mateus [2008].

Do estudo publicado sobre desastres de origem hidrológica (cheias e inundações) e geomorfológica (movimentos de massa em vertentes) no período entre 1865 e 2010 [Zêzere *et al.*, 2013], há registos de mais de 1300 pessoas mortas e 42 mil desalojadas. Só o concelho de Lisboa totaliza 20.3% do conjunto de movimentos de massa em vertentes com efeitos danosos registados em Portugal, ocupando o primeiro lugar do ranking nacional, Gráfico 1. Registaram-se para o período temporal em estudo, 56 movimentos de massa em vertentes, que provocaram 32 mortos, 125 evacuados e 402 desalojados [DISASTER, 2012].

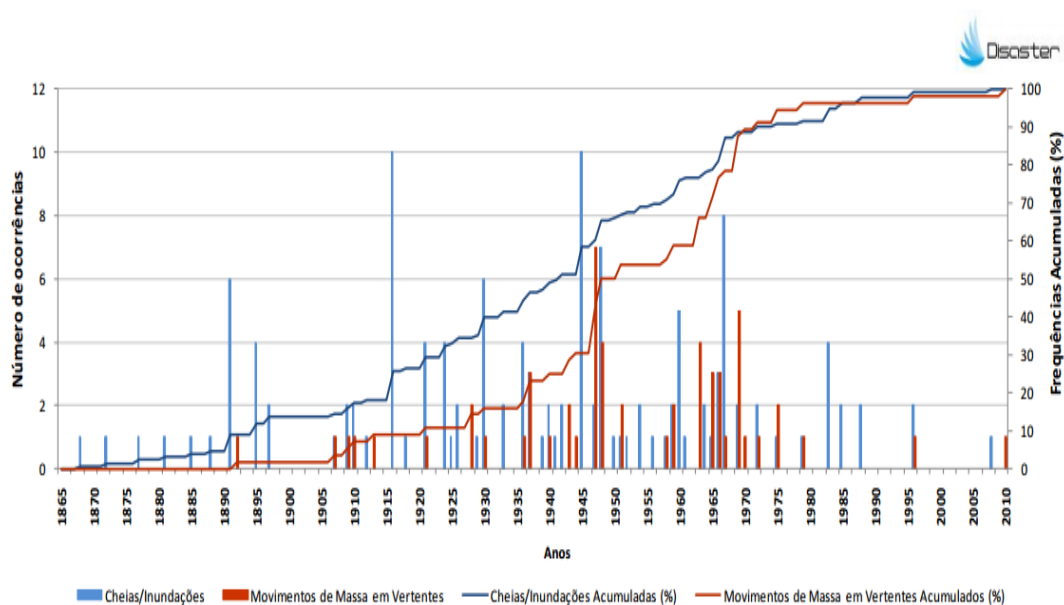


Gráfico 1 – Gráfico com frequência acumulada de registos de cheias/inundações e movimentos de massas em vertentes no concelho de Lisboa, para o período 1865-2010.

Fonte: [DISASTER, 2012]

1.1.2 Principais causas de ocorrência de movimentos de massa em vertentes

Nesta secção pretende-se caracterizar o tipo de terreno mais propício à ocorrência deste fenómeno assim como identificar as principais causas desencadeadoras do mesmo. Após isso, pretende-se fazer uma análise que permita conhecer melhor cada causa.

A ocorrência de instabilidade nas vertentes acontece principalmente em locais onde o terreno se apresente degradado ou fragmentado pela acção de agentes erosivos, e que desta forma manifeste deficientes características de resistência. Existem duas causas principais que podem provocar a ocorrência deste fenómeno. Uma é os fenómenos naturais como chuvas intensas ou processos geológicos relacionados com a geodinâmica interna como os sismos [Dias, 2010]. A outra é as alterações antrópicas causadas no uso do solo, uma vez que proporcionam fenómenos de erosão e arrastamento de detritos, e impermeabilização de terrenos devido à construção de edifícios ou acções de desflorestação [Mateus, 2008].

No que se refere à evolução histórica das alterações antrópicas provocadas em Lisboa, salienta-se os intensos movimentos migratórios inter-regionais desde os meados dos anos 50 até 1973-1974. Como consequência directa deste facto, registou-se um crescimento de extensas manchas suburbanas na área de Lisboa, “sem obedecerem a qualquer plano de ordenamento, ou contrariando as normativas em vigor” [PNPOT, 2007].

No que se refere à outra causa desencadeadora de instabilidade nas vertentes, que é as chuvas intensas e/ou prolongadas, o projecto “*Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*”, fez um estudo sobre as consequências potenciais da mudança climática durante o século XXI [Santos *et al.*, 2001]. Segundo esse projecto, os dados de precipitação no período 1931-2000 revelam um aumento de eventos meteorológicos extremos na última metade do século XX. Na análise do clima futuro para Portugal continental, o estudo em questão baseia-se nas simulações da mudança climática produzida pelo Modelo Climático Regional HadRM. Relativamente à precipitação anual projectada por esse modelo, esta decresce em todo o país salientando-se uma diminuição de 15% no Alentejo. No Inverno aumenta cerca de 20 a 50%. Do estudo apresentado salienta-se a previsão do aumento do fenómenos de precipitação extremos, nomeadamente com dias de precipitação intensa e acumulada (>10mm) em dias de Inverno, ampliando os riscos de cheias.

Da análise aos fenómenos desencadeadores do movimento de massas de vertentes, concluiu-se que estes tendem a aumentar, levantando-se a necessidade de se incluir a risco associada à ocorrência de instabilidades de vertentes em figuras do quadro legal para o ordenamento do território. Conforme irá ser apresentado na próxima secção esse trabalho já foi realizado, no entanto continua a existir a necessidade de se continuar esforços de investigação, para atenuar o efeito deste importante perigo natural [Mateus, 2008].

1.1.3 Ordenamento do território na prevenção de riscos naturais de movimentos de massa em vertentes

O ordenamento do território em Portugal, tal como em muitos países herdeiros do Império Romano já tem uma longa tradição onde D. Dinis é a referência maior, com trabalhos “de como se deve proceder no bom arranjo dos campos e das cidades, desde as areias do litoral às terras despovoadas de fronteira.” [PNPOT, 2007]. Foram no entanto necessários quase 7 séculos para que Portugal possuísse um instrumento legal integrador, a Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e de Urbanismo, que surgiu em 1998, pela Lei nº48/98 de 11 de Agosto. Esta lei define os objectivos gerais e princípios da política de ordenamento do território e estabelece o conjunto coerente e articulado dos Instrumentos de Gestão Territorial (IGT) de âmbito nacional, regional e local [Ferreira, 2009].

No que concerne ao enquadramento e melhoria da prevenção de riscos, surgiram diversos diplomas legais e instrumentos de planeamento como é o caso da Reserva Ecológica Nacional (REN), Planos de Ordenamento de Orla Costeira (POOC), e mais recentemente, o Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território, entre outros [Ferreira, 2009].

O regime jurídico da REN, estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 166/2008 de 22 de Agosto, define a REN como “uma estrutura biofísica que integra o conjunto das áreas que pelo valor e sensibilidade ecológicos ou pela exposição e suscetibilidade perante riscos naturais são objeto de proteção especial.” A REN visa contribuir para a ocupação e o uso sustentável do território e, segundo a alínea c) do n.º3 do artigo 2º, tem por objectivos:

- “Prevenir e reduzir os efeitos da degradação da recarga de aquíferos, dos riscos de inundação marítima, de cheias, de erosão hídrica do solo e de movimentos de massa em vertentes, contribuindo para a adaptação aos efeitos das alterações climáticas e acautelando a sustentabilidade ambiental e a segurança de pessoas e bens;”

De acordo com o artigo 4.º do DL nº 166/2008, as áreas de instabilidade de vertentes estão enquadradas dentro das áreas de prevenção de riscos naturais. Esta componente da REN não se limita a substituir as antigas “zonas declivosas” como as “áreas com riscos de erosão” e “escarpas e respectivas faixas de protecção” do antigo DL nº 93/90. Verificou-se que as zonas delimitadas anteriormente não protegiam áreas com riscos de erosão elevados uma vez que não consideravam “factores condicionantes decisivos como as características do substrato geológico.” Com o novo diploma da REN, passou-se a integrar na delimitação das áreas de instabilidade de vertentes, características climáticas, geológicas e geomorfológicas. [Ramos et al., 2010].

Num levantamento realizado pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR-LVT) os movimentos de massa em vertentes foram na sua grande maioria, desencadeados pela precipitação. De forma a avaliar os perigos dos movimentos de massa em vertentes na Área Metropolitana de Lisboa (AML), foi utilizada uma abordagem que se baseou na utilização dos dois principais factores condicionantes deste fenómeno: o declive e a litologia. A litologia, através dos seus parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno, refletem as propriedades de resistência mecânica dos terrenos e foi obtida através da Carta Geológica oficial de Portugal à escala 1:25000. O declive indica as tensões tangenciais registadas nas vertentes e foi obtido a partir da altimetria à escala 1:25000 [Ramos et al., 2010].

O documento produzido pela CCDR-LVT, o REN_AML, no ponto 5.3 transmite indicações para a delimitação da REN municipal, ou seja de como se produzir a cartografia de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades de vertente à escala municipal, dentro da AML. Segundo essas recomendações, essa cartografia deve ser realizada por especialistas no pressuposto que [Ramos et al., 2010]:

- “(i) os movimentos de vertente já ocorridos no território podem ser reconhecidos, classificados e cartografados;”
- “(ii) as condições que determinam os movimentos (factores de instabilidade) podem ser identificadas, registadas e utilizadas para construir modelos preditivos;”
- “(iii) a ocorrência de futuros movimentos de vertente pode ser inferida possibilitando o zonamento do território em classes de susceptibilidade.”

Para além destes pressupostos, são definidas ainda características específicas que devem ser seguidas na avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertente, de onde se realçam as seguintes:

- (1) “Escala de cartografia:1:10000;”
- (2) “Realizar inventário, determinação da tipologia e análise dos movimentos de vertente já verificados no território, com recurso a análise de fotografia aérea e ortofotomapas, devidamente validada com trabalho de campo;”
- (3) “Identificar e cartografar os factores de pré-disposição (condicionantes) responsáveis pelo aparecimento ou aceleração dos movimentos (e.g., declive, exposição e curvatura das vertentes, litologia, geomorfologia, solos;”
- (4) “Os modelos a utilizar para a predição das áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de vertente devem ser determinísticos, heurísticos ou estatísticos;”

A nível municipal, o instrumento usado para planeamento territorial é, desde a década de 90, o plano director municipal (PDM). Este documento é normalmente acompanhado por estudos de caracterização física e socioeconómica que apoiam a produção do mesmo. No âmbito da revisão do PDM de Lisboa, foi elaborado um estudo de caracterização biofísica de Lisboa em Fevereiro de 2010, onde, dentro do capítulo da geomorfologia e pedologia, se encontra uma secção dedicada à susceptibilidade de ocorrência de Movimentos de Vertente.

Segundo o relatório de caracterização biofísica de Lisboa, o modelo utilizado para a produção da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertentes, foi o modelo determinístico, ou de base física, que procura explicar a ocorrência de instabilidades de vertente através da aplicação de princípios físicos. Os principais parâmetros utilizados neste modelo (coesão e ângulo de atrito interno) são específicos para cada tipo de terreno e são determinados com base no comportamento geotécnico dos solos e das rochas da cidade de Lisboa com relatos de situações de instabilidade ocorridas. A principal fonte de informação para este trabalho, e que determina quais os parâmetros a usar em cada célula da área de estudo, é a carta geológica do concelho de Lisboa, à escala 1:10000, onde é indicada a distribuição espacial dos diferentes tipos de solo presentes.

A partir dos resultados do modelo aplicado, foram definidas três classes de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa, expressa como susceptibilidade moderada, elevada e muito elevada, Figura 1.

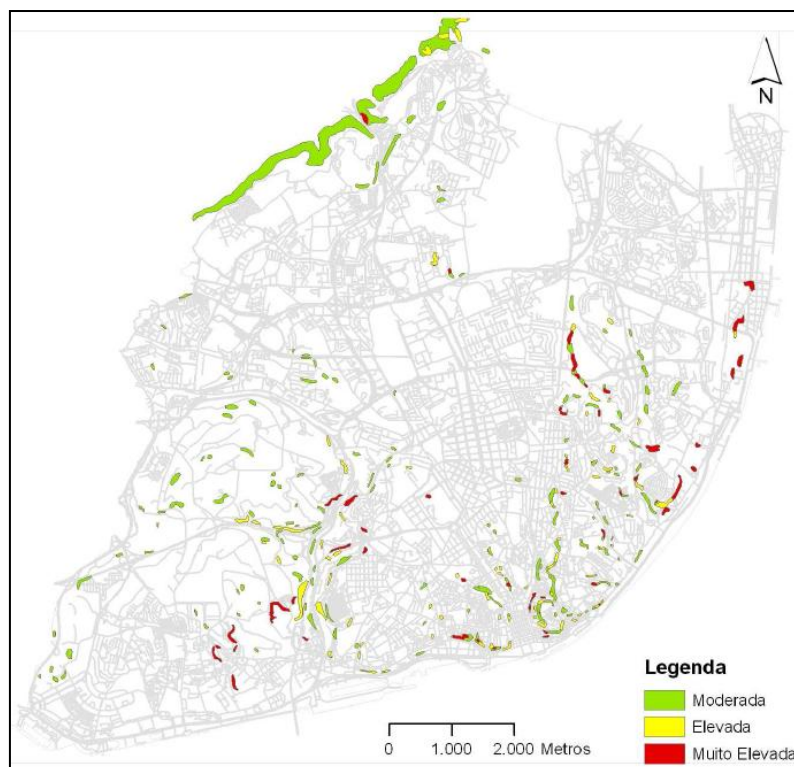


Figura 1 – Carta de susceptibilidade de ocorrência de movimentos de vertente
Fonte: [relatório caracterização biofísica de Lisboa]

Como resultado desse estudo, o PDM de Lisboa preconiza no artigo 23º medidas especiais de controlo e segurança para as zonas cartografadas como de muito elevada, elevada ou moderada susceptibilidade de ocorrência de movimentos de massa em vertentes. A título exemplificativo, transcreve-se as medidas indicadas no ponto 2 para as zonas cartografadas de muito elevada ou elevada susceptibilidade: “exige-se um estudo prévio integrado que demonstre a aptidão para a construção em condições de total segurança de pessoas e bens e que defina a melhor solução a adotar para a estabilidade da área em causa, ficando a ocupação condicionada à elaboração de um parecer elaborado por técnicos ou entidades credenciados, baseado em estudo geológico-geotécnico e hidrogeológico específico.”

1.1.4 Actualização da cartografia geológica oficial

A cartografia geológica oficial (que é a base dos modelos utilizados para se produzir cartografia de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertentes), embora detalhada e precisa, não tem em conta as grandes mudanças superficiais do solo induzidas pelas actividades humanas sob a forma de escavações, aterros e obras de estabilização [Vasconcelos e Marques, 2011]. Este facto assume uma importância suplementar principalmente em zonas urbanas, onde o substrato geológico foi sucessivamente alterado ao longo dos anos devido à necessidade que as pessoas

sentiram de adaptar a topografia existente aos diversos usos do solo e de “colmatar depressões de origem natural ou artificial (pedreiras, barreiras, areeiros), bem como escavações, que em muitos casos são parcialmente ou totalmente colmatados por aterros” [Vasconcelos e Marques, 2010]. Estas acções antrópicas alteraram significativamente a “natureza e propriedades geotécnicas” do terreno, condicionando a sua resposta a factores desencadeantes de instabilidade de vertentes, como “precipitações intensas e/ou prolongadas, sismos, descargas no sopé, vibrações e infiltrações concentradas de origem antrópica” [Vasconcelos e Marques, 2010]. Surgiu então a necessidade de melhorar a informação de base dos modelos de base física utilizados para a determinação da susceptibilidade à ocorrência de instabilidades de vertente, uma vez que a cartografia geológica é crucial na obtenção de resultados de qualidade. Nesse âmbito, foi realizado o trabalho “Cartografia tridimensional de aterros e escavações no concelho de Lisboa”, financiado pelo projecto GeoSIS_Lx (PTDM/ECM/64167/2006), pela FCT e pelo projecto “Avaliação de Riscos Naturais e Tecnológicos na Cidade de Lisboa” (LISBOA-02-3207-FEDER-000044), cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER). [Vasconcelos e Marques, 2010].

A dissertação “Cartografia de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente em contexto urbano: o concelho de Lisboa”, elaborada por Manuel Afonso Domingues Frazão Vasconcelos e orientada pelo Professor Doutor Fernando Manuel Silva da Fonseca Marques, é um resultado do projecto “Avaliação de Riscos Naturais e Tecnológicos na Cidade de Lisboa”. Nessa dissertação foi apresentada uma actualização da cartografia geológica base de Lisboa com dados de aterros identificados com recurso a foto interpretação de fotografias aéreas de diversas épocas, onde foram utilizadas séries de fotografias aéreas com cobertura estereoscópica da cidade de Lisboa datadas de 1947, 1958, 1977-1978, 1987 e 2004, Figura 2.

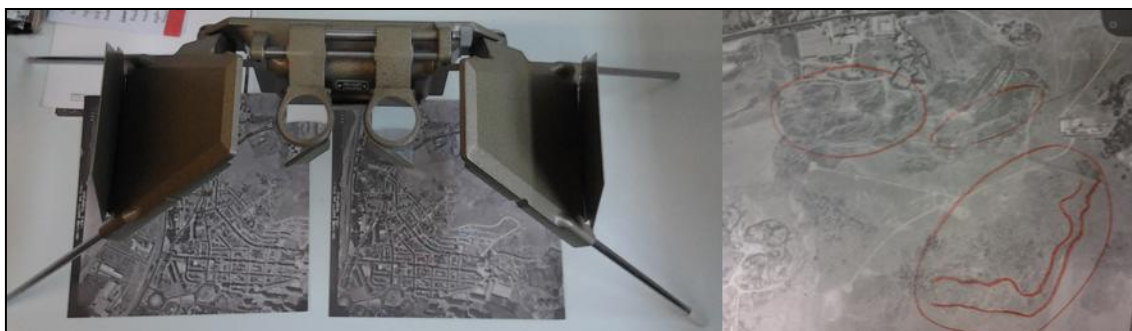


Figura 2 – Exemplo de identificação de aterros com recurso a fotointerpretação

Na elaboração desse levantamento, foram identificadas por Vasconcelos [2011], as seguintes dificuldades:

- (1) Definição precisa do local e espessura de aterros e escavações, principalmente por apresentarem geometrias muito irregulares.
- (2) A série de fotografias de 1947, por possuir pior qualidade, não permitiu realizar uma recolha de informação tão detalhada como as restantes.
- (3) O inventário de aterros e escavações depende da escala das fotografias usadas, na medida em que quanto maior a escala das fotografias usadas, mais fácil é identificar os elementos em causa.

A junção das zonas alteradas por actividades antrópicas com a informação geológica à escala 1:10000, resultou numa actualização da carta geológica do concelho, que serviu de base para a produção de cartografia de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades de vertente em Lisboa, Figura 3.

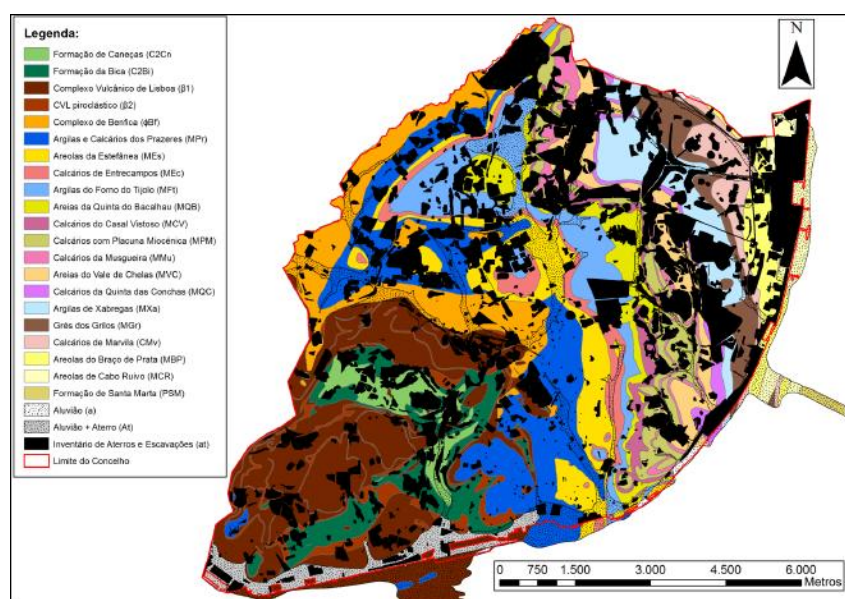


Figura 3 – Carta de geológica do concelho de Lisboa actualizada
Fonte: [Vasconcelos, 2011]

1.1.5 Definição de Modelo Digital de Elevação

“Typically a digital terrain model is limited to a 2.5D representation using the function $z=f(x,y)$, which maps a certain height value z to each 2D position $p(x,y)$ ” [Briese, 2010]. O MDE é definido como um conjunto de dados em suporte numérico que, para uma determinada zona, associa um valor de elevação a um ponto definido sobre o plano planimétrico, descrevendo desta forma o seu relevo.

Na área da produção cartográfica existem dois tipos principais de MDE, consoante a superfície que representem, o modelo digital de terreno (MDT) e o modelo digital de superfície (MDS), Figura 4. O MDS é utilizado quando se representa a superfície terrestre com todos os elementos naturais ou artificiais que sobre esta existam (vegetação ou edifícios, pontes), enquanto o MDT descreve apenas a superfície do terreno. O MDT coincide com o MDS apenas em áreas abertas. [Redweik, 2012].

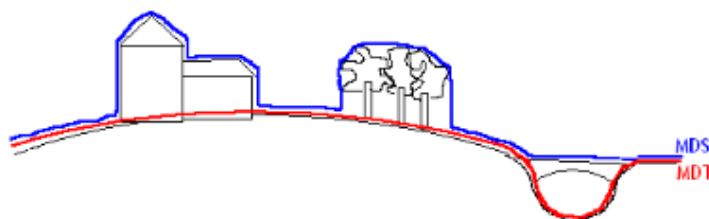


Figura 4 – Diferenças entre o MDS (a azul) e o MDT (a vermelho).
Fonte: [Redweik, 2012]

Segundo Matos [2008], existem 3 problemas fundamentais no domínio dos modelos digitais de terreno que é necessário ter em consideração:

- (1) A melhor forma de modelar um fenómeno geográfico com distribuição contínua, nomeadamente sob a forma de dados matriciais ou estruturas vectoriais.
- (2) A quantidade de informação necessária para modelar um fenómeno para que os resultados sejam suficientemente próximos da realidade e diminuindo a importância da interpolação.
- (3) As dificuldades de processamento de um elevado volume de dados. Um modelo de terreno pode facilmente ultrapassar 1Gb (território nacional com células espaçadas de 25 em 25m ultrapassa os 2Gb), repetindo-se este valor sempre que é gerada uma matriz auxiliar ou derivada como a matriz de declives ou direcções de escoamento.

O MDT adquiriu actualmente um papel essencial em áreas como a cartografia, engenharia civil, hidrografia, gestão de recursos naturais e protecção civil. A sua utilização é frequente nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitindo a representação tridimensional do terreno, desenho de perfis, curvas de nível, cálculo de volumes, zonas de intervisibilidade, cartas de declive e de orientações de encostas, rede de drenagem e bacias hidrográficas. [Matos, 2008]

1.1.6 Métodos de recolha de amostras primárias

Para se produzir um MDE, é necessário uma amostra primária de pontos cotados que podem ter várias origens. Segundo Briesse [2010], a recolha desses pontos tinha tradicionalmente origem em levantamentos topográficos e mais tarde em técnicas de fotogrametria analítica, como a estereofotogrametria. Na última década surgiram novas técnicas de medição altamente automatizadas como a correspondência automática de imagens, a interferometria de radar (InSar) e o *laser scanning*, conhecido por Light Detection and Ranging (LiDAR). Estas técnicas tem em comum o facto de permitirem obter uma amostra de dados densa da área de estudo num curto período de tempo.

Utilizando a técnica de estereofotogrametria, o operador pode restituir curvas de nível ou pontos isolados no modelo estereoscópico. Esta amostra pode ser obtida ao nível do solo, para se produzir um MDT, ou incluindo edifícios e vegetação, para se produzir o MDS [Redweik, 2012].

A correspondência automática de imagens consiste em determinar pontos homólogos em pares estereoscópicos, recorrendo a diversos operadores de processamento digital de imagem (PDI). Como a base desta técnica é a informação radiométrica das imagens, a amostra de pontos resultante apenas poderá gerar um MDS. A nuvem de pontos produzida por este método concentra-se principalmente na periferia de pontos conspícuos e nos limites de objectos, uma vez que as variações radiométricas nessas zonas são elevadas, e por conseguinte facilmente identificáveis em ambas as fotografias que compõem um par estereoscópico [Pfeifer e Mandlbürger, 2008].

A interferometria Radar, é um método utilizado pela primeira vez na missão *Shuttle Radar Topography Mapping* (SRTM). Através de 2 antenas radar para emissão e recepção de dados, distanciadas de 60 m, foi possível obter duas imagens de alta resolução a partir do mesmo ponto na superfície da terra. A ligeira diferença entre as duas imagens permite aos cientistas produzir um MDS com uma resolução que oscila entre os 30 m e 90 m [NASA, 2013].

A utilização da técnica de *laser scanning*, como principal instrumento para se obter um MDE, tornou-se muito popular na comunidade científica a partir do início dos anos 70, quando os sistemas LiDAR aéreos conseguiram medir distâncias (entre a aeronave e pontos no terreno), com exactidões inferiores a 1 metro. [Beraldin *et al.*, 2010]. Desde essa altura foram introduzidos diversos melhoramentos no funcionamento do sistema, tendo o seu uso sido generalizado. A produção de MDT fotogrametricamente pelas

autoridades nacionais de cartografia, foi gradualmente sendo substituída por MDT obtidos por *laser scanning*. Entre os países que utilizam esta técnica realça-se a Holanda, que possui um MDT nacional completo desde 2003 [Brügelmann e Bollweg, 2004] e a Suíça com todas as áreas levantadas abaixo dos 2000 m [Artuso *et al.*, 2003]. Noutros países como os EUA, Alemanha e Áustria, os MDT produzidos por *laser scanning* são realizados a nível federal e não nacional [Pfeifer e Mandlbürger, 2008].

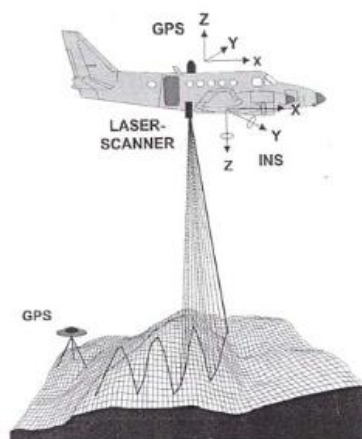


Figura 5 – Componentes do sistema LiDAR
Fonte: [Redweik, 2012]

O LiDAR é formado por dois componentes principais, o dispositivo emissor de um feixe de raios laser e o sistema *Global Navigation Satellite System* (GNSS) / *Inertial Measurement Unit* (IMU), a partir de agora referido como GNSS/IMU, Figura 5. O sistema laser emite um pulso laser que é refletido em cada ponto da superfície terrestre e captado pelo mesmo. A distância entre o ponto no terreno e o sensor é calculada pela metade do intervalo de tempo medido entre a emissão e a reflexão do feixe multiplicado pela velocidade da luz [Meng *et al.*, 2010]. O sistema GNSS/IMU mede em cada momento a posição exacta e a orientação espacial do feixe, permitindo desta forma determinar as coordenadas tridimensionais de cada ponto à superfície da terra e gerar um MDS [Redweik, 2012].

Meng *et al.* (2010), defende que a técnica LiDAR para recolha de dados primária para um MDT, é consideravelmente melhor que as tradicionais (técnicas fotogramétricas ou correlação automática de imagens) devido a quatro razões:

- (1) A nuvem de pontos LiDAR é densa e permite gerar MDE de alta precisão e resolução;

- (2) É possível extrair as superfícies de objectos, com base na análise do contexto das elevações da nuvem de pontos LiDAR;
- (3) É mais fácil cartografar regiões com pequenas variações texturais, devido à utilização de nuvens densas de pontos;
- (4) É possível identificar a estrutura das copas das árvores, uma vez que os pulsos penetram na vegetação criando múltiplos retornos;

Quando comparado com as técnicas clássicas de recolha da amostra primária de pontos, onde a aquisição da informação da superfície terrestre é realizada simultaneamente com a interpretação humana da área, a recolha dos dados pelos sistemas automáticos não o é. Essa interpretação é efectuada separadamente numa fase de pós-processamento dos dados, onde é necessário extrair da nuvem de dados original apenas os que representem a superfície terrestre. Para responder a esta necessidade surgiu uma enorme panóplia de algoritmos para extrair automaticamente um MDT a partir de um MDS.

Segundo Briese [2010], esses algoritmos são normalmente divididos em duas fases: a classificação e a interpolação. A classificação extrai automaticamente informações da superfície terrestre a partir dos dados adquiridos, classificando-os como “terreno” e “não terreno” (este processo é também conhecido por “filtragem”. Consequentemente, com base nos dados classificados como terreno, pode-se posteriormente obter um MDT por métodos de interpolação apropriados.

Desenvolver um algoritmo rápido, eficaz e preciso que identifique pontos terreno de uma nuvem de dados e crie um MDT, continua a ser um desafio para o qual ainda não existe uma solução consensual e que continua a motivar a comunidade científica [Meng *et al.*, 2010].

1.2 Objectivos

Em Portugal a ocupação e o uso sustentável do território é uma preocupação premente, legislada em diversos diplomas legais. Nesse âmbito, é crucial uma correcta identificação das áreas de protecção especial que, pelo seu valor e sensibilidade ecológicas e pela sua susceptibilidade perante riscos naturais, assumam especial relevância.

O instrumento de planeamento territorial do município de Lisboa, o PDM, define na planta de riscos naturais e antrópicos I, as áreas de vulnerabilidade a inundações e a

susceptibilidade de ocorrência de movimentos de massa em vertentes. Face à necessidade de melhorar a informação de base que dá origem à carta de susceptibilidade de ocorrência de movimentos de vertente, foi elaborado um trabalho de cartografia tridimensional de aterros e escavações no concelho de Lisboa, por fotointerpretação de fotografias aéreas de diferentes datas (1947 a 2004). Os resultados desse trabalho dependem, de forma geral, da escala das fotografias usadas e, por serem um produto de uma fotointerpretação, do operador que a realiza. Para além disso, foram também descritas dificuldades na delimitação precisa da área e na determinação da sua espessura.

Esta tese insere-se no contexto do referido trabalho, tendo por objectivo principal a identificação precisa de aterros e escavações na cidade de Lisboa, de forma automática e independente da escala das fotografias utilizadas e com determinação da espessura dos mesmos.

Para tal serão investigados e desenvolvidos algoritmos a fim de produzir um MDT a partir de dados LiDAR de 2006, através de técnicas de processamento digital de imagem. Posteriormente, e com recurso a técnicas fotogramétricas pretende-se gerar o MDT com recurso à cobertura aérea mais remota obtida com fins cartográficos sobre a mesma zona, que data de 1944. Da análise comparativa entre os dois modelos, pretende-se identificar e cartografar as zonas de aterro e escavação que surgiram na cidade durante esse período temporal, complementando o levantamento realizado por interpretação estereoscópica para o período de 1947-2004.

Os objectivos específicos desta dissertação são:

- (1) Identificar os vários métodos para produzir um MDT a partir de dados LiDAR.
- (2) Desenvolver um método que produza um MDT por filtragem de MDS a partir de dados LiDAR.
- (3) Avaliar qualitativamente e quantitativamente a qualidade do método desenvolvido.
- (4) Produzir uma amostra primária de pontos cotados, a partir de técnicas de correspondência automática de imagens fotográficas.
- (5) Aplicar técnicas automáticas já existentes para filtrar a amostra primária e produzir um MDT.
- (6) Identificar o melhor método de interpolação para produzir o modelo digital de terreno, a partir da amostra primária de pontos cotados.

- (7) Identificar com precisão zonas de aterros e escavações, por comparação dos MDT obtidos, avaliando a sua espessura.
- (8) Avaliar a qualidade dos mapas de aterros e escavação produzidos para o período temporal em estudo.

1.3 Área de estudo

A área de estudo corresponde à zona coberta pelos dados LiDAR, que se encontram dentro da folha 431 da Carta Militar, série M888, escala 1:25000, Figura 6. Essa faixa encontra-se dentro do concelho de Lisboa e possui uma forma rectangular com 6.25 km x 5.14 km, equivalendo a 32.12 km², ou seja, a aproximadamente a 40% do concelho. Está enquadrada, de forma geral, a Este pelo rio Tejo, a Oeste pela Serra de Monsanto, a Norte pelo aeroporto de Lisboa e a Sul pelo castelo de S. Jorge. Por corresponder a uma zona central do concelho e estar próxima do centro histórico da cidade, é actualmente uma região fortemente urbanizada.

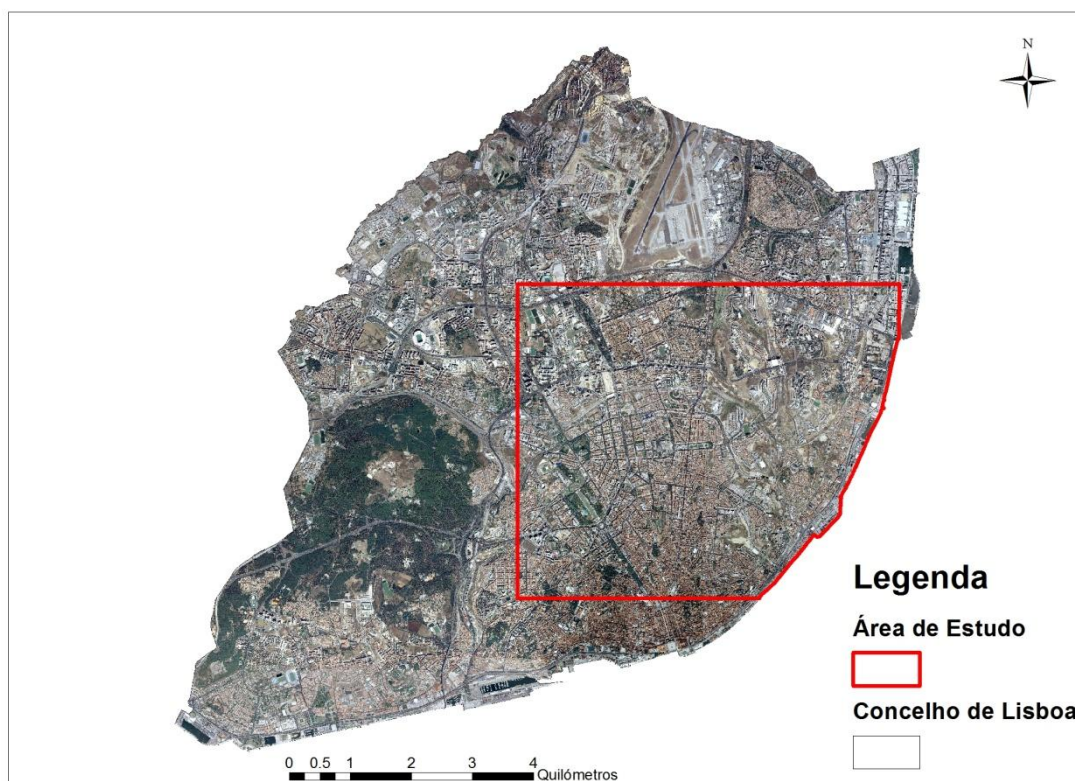


Figura 6 – Área de estudo

1.4 Fonte de dados

Nesta secção são descritas as duas principais fontes de informação que foram objecto de estudo desta dissertação, as fotografias aéreas e os dados LiDAR. É efectuada uma breve descrição das suas características e das principais operações a que foram sujeitas durante o seu processo de aquisição.

1.4.1 Fotografias aéreas

As fotografias aéreas, foram utilizadas durante muitos anos apenas como uma fonte de informação cartográfica, expirando-se a sua importância com a elaboração da carta topográfica. Com o aparecimento da fotogrametria digital e com a utilização em larga escala das tecnologias da informação, estas recuperaram uma nova importância para diversas áreas como a arqueologia, a história, a geografia e a geologia uma vez que encerram em si um testemunho visual da época em que foram obtidas [Redweik *et al.*, 2012].

As fotografias aéreas utilizadas neste trabalho, têm os seus originais na colecção de Fotografias aéreas antigas, existentes no arquivo do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE). Esta colecção, que cobre quase a totalidade do território nacional com mais de 40000 fotografias, está classificada como “SPLAL” (Sociedade Portuguesa de Levantamentos Aéreos Limitada) e datada de 1937-1952.

No âmbito da tese de mestrado “Recuperação Radio-Geométrica e Catalogação Digital de Coberturas Aéreas Antigas da Zona de Lisboa” de António Manuel Guerreiro Marques, foi desenvolvido um trabalho com as fotografias correspondentes de 6 folhas da carta 1:25000, com o objectivo de organizar os negativos, digitalizar as imagens, efectuar a recuperação radiométrica e geométrica das fotografias antigas, obter os parâmetros de orientação externa (OE) das fotografias através de processos de aerotriângulação automática (ATA) e organizar um catálogo digital na forma de um SIG. O projecto foi realizado no sistema de coordenadas Hayford-Gauss/Datum Lisboa - Militar, a partir de agora denominado por HGDLx – Militar.

A cobertura aérea respeitante à carta 1:25000 da folha “431 - Lisboa”, com data de voo de 1944, é constituída por 59 fotografias aéreas dispostas por faixas com orientação Oeste-Este. Foram obtidas com a câmara aérea Zeiss® RMK S 1818, da qual não existe certificado de calibração, com formato 18 cm x 18 cm e constante de câmara de 204,4 mm. Segundo o autor, a escala e altura média aproximada de voo são 1:15702 e 3209 m, respectivamente. As fotografias foram digitalizadas com uma

resolução radiométrica de 8 bits, o que significa que cada pixel poderá ter 256 níveis de cinzento e com uma resolução geométrica de 21 μm .

O resultado final da digitalização originou fotografias escuras e com pouco contraste, o que, segundo Marques [2009] se deve a uma radiometria original alterada, visível nos “negativos claros devido a uma emulsão ‘bastante’ gasta”. A radiometria das fotografias foi corrigida através de um algoritmo desenvolvido em Matlab® de forma a acentuar o contraste das imagens e a recuperar “a sua radiometria original”.

Para esta tese foram utilizadas 20 das 59 fotografias da folha 431, que cobriam a área de estudo, assim como as OE calculadas por ATA, Figura 7. A precisão geral do ajustamento obtida por ATA, para o bloco do qual as fotografias foram extraídas, foi de 27.3 μm , excedendo a tolerância definida no projecto de 21 μm .

PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERNA OBTIDOS

CARTA	FIADA	NUMERO	X	Y	Z	OMEGA	PHI	KAPPA
401A	B	158						
401A	A	141						
401A	B	159	86198,660	210818,315	2965,393	1,481	-0,357	89,832
401A	B	160	86179,594	211622,404	2968,853	1,209	0,204	89,127
401A	B	161	86169,562	212432,929	2970,718	1,355	0,25	89,132
401A	B	162	86162,399	213248,912	2966,815	1,104	-0,346	89,779
401A	B	163	86159,144	214058,566	2968,305	1,178	0,132	91,855
401A	B	164	86151,186	214865,507	2963,902	1,603	0,379	93,156
401A	A	142	87676,154	211029,935	3154,967	0,023	0,185	89,132
401A	A	143	87668,603	211858,248	3160,779	0,135	0,597	90,768
401A	A	144	87674,905	212675,378	3164,556	0,454	0,171	88,525
401A	A	145	87680,700	213491,427	3170,401	0,466	0,041	90,091
401A	A	146	87677,738	214307,105	3173,609	-0,126	0,556	89,935
401A	A	147	87677,348	215136,335	3175,340	-0,395	0,978	89,715
401A	A	148	87680,414	215977,269	3175,305	-0,602	0,492	90,323
401A	A	149	87679,164	216820,394	3173,987	-0,373	0,45	90,452
401A	A	150	87669,848	217656,496	3175,548	-0,15	0,574	92,834
415	D	173	83495,969	204357,700	3007,565	-0,142	1,097	87,718
415	D	174	83508,806	205194,142	3014,713	-0,145	0,496	89,217
415	D	175	83516,753	206042,186	3020,046	-0,539	0,114	90,101
415	D	176	83548,641	206893,129	3023,997	-0,153	1,514	86,274
415	D	177	83582,640	207742,715	3019,494	0,575	0,822	90,588

Figura 7 – Fotografias usadas com respectivas OE
Fonte: [Marques, 2009]

1.4.2 Dados LiDAR

Os dados LiDAR utilizados nesta investigação foram fornecidos pela empresa LOGICA, Figura 8. Estes foram adquiridos de helicóptero, num trabalho de campo realizado em 2006, com o equipamento LiDAR TopoSys II 83 kHz, onde foram registados o primeiro e último eco de cada impulso laser e os valores de intensidade respectivos [Redweik *et al.*, 2011]. O levantamento de campo foi realizado com uma taxa de emissão de 83 mil impulsos laser por segundo, medindo uma média de 20 pontos por m^2 . A precisão absoluta horizontal divulgada pelo fabricante é 0.5 m, e a vertical de 0.15 m. A nuvem de pontos adquirida foi pós-processada, sendo fornecida sob a forma de uma estrutura matricial, com espaçamento de 1 m [Redweik *et al.*, 2011]. Nesta representação de MDE, cada célula possui um único valor que representa a elevação de toda a área coberta pelo pixel da estrutura matricial [Briese, 2010].

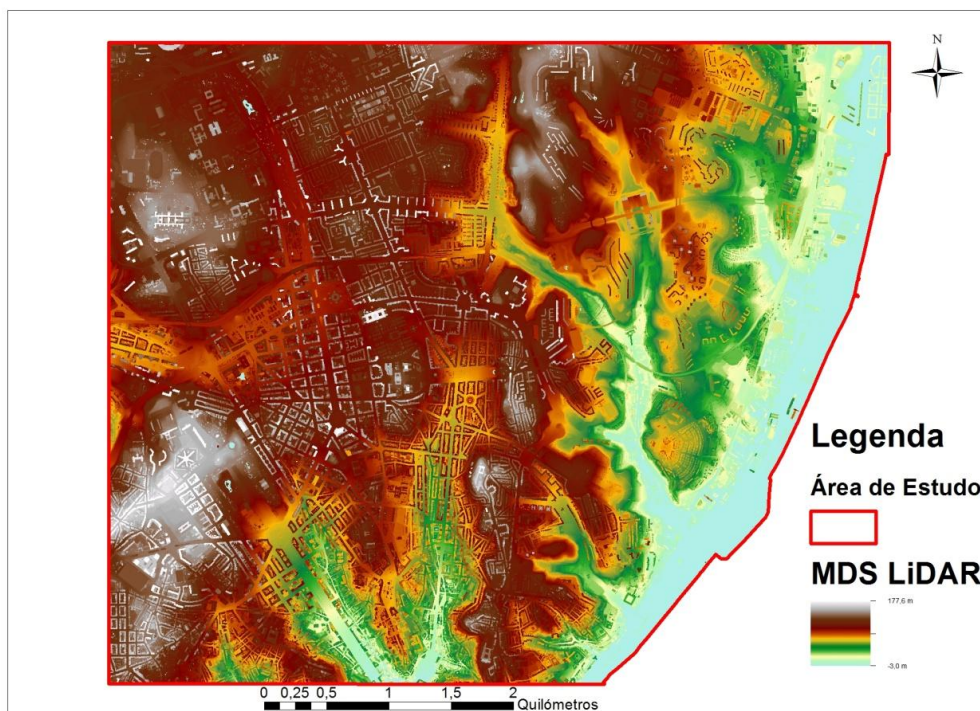


Figura 8 – MDS LiDAR original

1.5 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos.

No segundo capítulo está compilada toda a investigação e resultados obtidos na elaboração do MDT a partir de dados LiDAR. Revêem-se estudos prévios onde foram utilizadas técnicas para fazer a separação de pontos “não terreno” de pontos “terreno”, assim como análises comparativas publicadas. É apresentado o conceito do método de filtragem utilizado no trabalho e o algoritmo desenvolvido para melhorar os resultados desse método. São revistas as técnicas de interpolação e de avaliação utilizadas. Por fim, são expostos os procedimentos e resultados finais.

No terceiro capítulo está compilada toda a investigação e resultados obtidos na elaboração do MDT a partir das fotografias aéreas. Está descrita a forma como se obteve a amostra primária de pontos e como os pontos “não terreno” foram filtrados. É apresentado um estudo comparativo entre duas técnicas de interpolação distintas, assim como a avaliação geral dos resultados obtidos.

No quarto capítulo são descritos os procedimentos necessários à elaboração da carta de aterros e de escavações, produto final da dissertação. É apresentado um estudo relativo à identificação dos erros dos modelos digitais que mais contribuem para zonas

erradamente classificadas como “aterro” ou “escavação”. Este capítulo culmina com a validação dos resultados obtidos através de uma carta de aterros e escavações obtida manualmente por fotointerpretação, noutra trabalho.

No quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões e algumas perspectivas futuras.

2 Modelo digital do terreno a partir de dados LIDAR

A produção de um MDT a partir de dados LiDAR, adiante designado por MDT LiDAR, é obtido através de um processo automático constituído por 4 etapas principais [Meng *et al.*, 2010]:

- (1) Eliminação de erros: Consiste na análise prévia da nuvem de pontos irregularmente espaçada e detecção de *outliers*. Estes erros são provocados por pássaros, aviões ou erros no próprio sensor.
- (2) Reamostragem e reorganização: Consiste na elaboração de uma grelha regular a partir da nuvem de pontos irregularmente espaçada para facilitar as operações de análise de vizinhança entre pixéis. Isto permite que, para se obter um MDT a partir do MDS, se apliquem algoritmos de filtragem semelhantes aos métodos já existentes para PDI. A elaboração dessa estrutura matricial regular (raster) pode ser feita através de diversas operações, como a selecção do ponto mínimo, máximo, média, mediana, entre outras. A desvantagem desta operação é a perda de precisão dos dados ao serem transformados numa estrutura raster.
- (3) Classificação: Esta etapa, também conhecida por filtragem, consiste na separação dos pixéis “terreno” dos pixéis “não terreno” da nuvem de pontos.
- (4) Interpolação: Após a classificação da nuvem em pontos “terreno” e “não terreno”, falta fazer a interpolação. Como o número de pontos é elevado, assim como a sua densidade, não é necessário aplicar os melhores métodos de predição como o kriging. A escolha deve recair sobre métodos que apresentem melhores performances computacionais [Pfeifer e Mandlbürger, 2008].

Uma vez que os dados LiDAR utilizados já tinham sido pós-processados, secção 1.4.2, nesta tese apenas se aplicaram as operações indicadas nos tópicos (3) e (4). Assim, nas próximas secções serão revistos os principais métodos de classificação, as vantagens e desvantagens de cada um e o algoritmo que está na base do processo de filtragem utilizado neste trabalho. A técnica de interpolação é revista na secção 2.3 e na secção 2.4 são descritas as técnicas usadas para avaliar a qualidade do MDT LiDAR produzido. Na secção 2.5 introduz-se o *software* MATLAB®, e por ultimo, na secção 2.6 descreve-se a metodologia desenvolvida para implementar o processo de filtragem assim como os resultados obtidos.

De realçar que todas as operações efectuadas durante a elaboração do MDT LiDAR, se referem ao sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89 – European Terrestrial

Reference System 1989. Adoptou-se este sistema de coordenadas por coincidir com o sistema dos dados LiDAR fornecidos.

2.1 Revisão de Algoritmos de filtragem de dados LiDAR

A filtragem assume um papel essencial no processo de construção de um MDT com base em dados LiDAR. A maioria dos algoritmos de filtragem hoje em dia, são construídos com base em critérios geométricos e usam estruturas raster como base de trabalho (estas permitem realizar de forma simples e rápida operações de vizinhança entre pixéis). As abordagens mais simples consideram apenas a identificação de um ponto mínimo dentro de uma área de tamanho fixo e classifica-o como “terreno”. A limitação destes filtros é a presunção que o terreno é plano dentro dessa área, conduzindo muitas vezes a resultados insatisfatórios em zonas de declive acentuado.

De acordo com Briese [2010], foram desenvolvidos vários tipos de filtros para resolver esse problema e que podem ser classificados em quatro categorias: morfológicos (*morphological*), densificação progressiva (*progressive densification*), baseados em superfícies (*surface-based*) e baseados em segmentos (*segment-based*).

Na próxima secção serão brevemente apresentadas as quatro categorias de filtros referidas.

2.1.1 Filtro Morfológico

Este grupo de filtros baseia-se em operações de morfologia matemática aplicadas no processamento digital de imagens. Segundo Soares [2011], a morfologia matemática é uma teoria destinada à análise espacial de estruturas e que compreende a análise da forma dos objectos recorrendo à lógica de conjuntos. As duas operações básicas são a *dilatação* e a *erosão* [Briese, 2010]. Estas operações permitem efectuar uma simplificação na imagem de acordo com um elemento estruturante (EE), também chamado de janela ou *kernel* em vários trabalhos. A combinação de ambas chama-se *abertura* (erosão após dilatação) ou *fecho* (dilatação após erosão), Figura 9. O operador *abertura morfológica* pode ser utilizado para determinar pontos mínimos, o que conduz a uma aproximação do MDT [Briese, 2010].

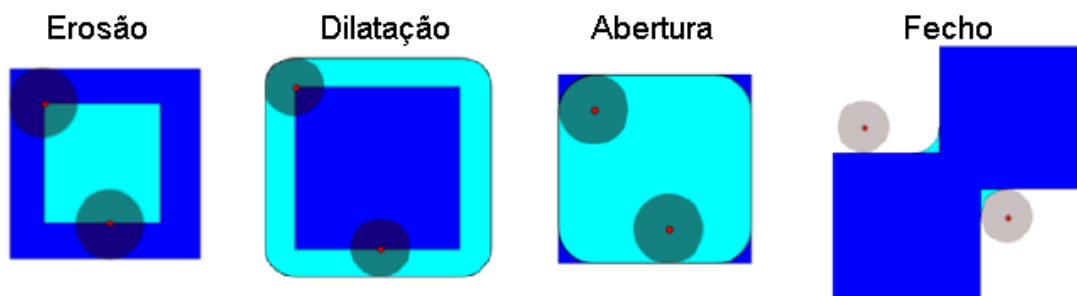


Figura 9 – Morfologia Matemática: As zonas a azul claro representam os resultados das operações do EE de forma circular, nos quadrados azuis-escuros.
Fonte: Adaptado de Wikipédia [2013a]

Baseado neste conceito, Kilian [1996] apresentou um método para se obter um MDT a partir de dados LiDAR de uma zona arborizada, baseado num filtro morfológico (abertura morfológica) aplicado a uma imagem de cinzentos. Os pontos mais baixos dentro de uma determinada janela de tamanho pré-definido são identificados inicialmente. Posteriormente, os pontos dessa janela que se localizem dentro de uma determinada banda acima do ponto mais baixo são considerados como pontos terreno e é interpolada uma superfície para se gerar o MDT. A conclusão deste trabalho é que a escolha do tamanho do elemento estruturante usado na operação da abertura morfológica é um parâmetro crítico para o qual não existe um valor ideal. Assim, é sugerido o uso de vários EE com diferentes tamanhos.

Vosselman [2000], propôs um método de filtragem baseado no operador *erosão morfológica* e no declive. Neste algoritmo, um ponto é classificado como terreno se não existir nenhum outro na sua vizinhança, para o qual a diferença de alturas entre eles exceda o limite máximo. Este método considera que o declive do terreno não excede um determinado limite e que os objectos com declives superiores ao limite são classificados como não terreno. Em 2001, foi proposto por Sithole uma actualização deste método baseado numa adaptação do valor do limite (definido pelo operador), de acordo com o valor calculado do declive do terreno.

Wack e Wimmer [2002], propuseram um método hierárquico de pesos. Inicialmente interpola-se um MDS de baixa resolução a partir dos dados originais LiDAR e utiliza-se o operador Laplaciano do Gaussiano (LOG) e um limite com uma altura pré-definida para se filtrar grosseiramente a maior parte dos edifícios e vegetação densa. Depois calcula-se a função de pesos considerando o desvio padrão de cada elemento. Assim, o algoritmo gera um MDT de baixa resolução baseado no peso de cada ponto e, hierarquicamente, gera MDT de alta resolução por interpolação dos anteriores.

Zhang *et al.* [2003], propôs um filtro morfológico progressivo com o objectivo de excluir pontos não terreno como carros, vegetação e edifícios, enquanto mantém os pontos terreno. Para tal o algoritmo aplica a *abertura morfológica clássica* e gradualmente vai aumentando o tamanho do EE. Sobre o resultado desta operação é depois aplicado um *threshold* (limite) que depende do tamanho do EE utilizado para classificar os pontos em “terreno” e “não terreno”. Embora este método elimine com eficácia a maioria dos pontos não terreno, é baseado na assunção que o declive é constante.

2.1.2 Filtro por densificação progressiva

Os métodos que pertencem a esta categoria, seguem uma estratégia diferente da anterior. Estes algoritmos começam com uma pequena amostra da nuvem de pontos inicial (pré-classificados como pontos “terreno”) e depois continuam por adição sucessiva de pontos interactivamente de forma a classificar todo o conjunto de dados, não sendo necessário efectuar interpolações [Briese, 2010].

Um método representativo desta categoria é a densificação progressiva da TIN (*Triangular Irregular Network*), introduzida por Axelsson [2000]. O algoritmo de Axelsson, selecciona inicialmente uma TIN, a partir dos dados iniciais. Esta TIN está inicialmente debaixo da nuvem de pontos e o objectivo é ajustar a superfície TIN à nuvem de pontos. Em cada interacção, a curvatura da superfície pode flutuar (dentro de parâmetros definidos) e os pontos da nuvem são inseridos na TIN. O processo termina, quando não for possível inserir mais pontos terreno.

2.1.3 Filtro baseado em superfícies

Semelhante aos algoritmos baseados na densificação progressiva, todos os métodos que utilizem uma estratégia baseada em superfícies, constroem uma superfície de referência a partir da nuvem de pontos para posteriormente a utilizar para filtragem do resto dos pontos. Diferem no entanto dos métodos pertencentes à categoria anterior (onde os pontos são classificados como “terreno” por etapas), por considerarem que todos os pontos fazem parte do MDT, e depois vão sucessivamente eliminando os que não satisfazem determinados critérios definidos pelo operador, refinando o resultado final.

Um método característico desta categoria foi o sugerido por Kraus e Pfeifer [1998], denominado por “*filtering based on robust interpolation*”. O seu método consiste em começar com um MDT aproximado e usar as distâncias entre a superfície inicial e os pontos medidos para gerar um conjunto de pesos para todos os pontos (entre [0 e 1])

que seriam usados na determinação do MDT, por ajustamento pelo MMQ. Se os resíduos altimétricos entre a superfície interpolada e os pontos medidos forem acima de um determinado limite, o ponto correspondente é classificado como não terreno e é eliminado do MDT interpolado.

2.1.4 Filtro baseado em segmentação

Ao contrário das abordagens anteriores, onde a classificação é efectuada sempre sobre um ponto, os métodos que correspondem a esta categoria classificam todo um segmento, ou seja, um conjunto de pontos vizinhos com propriedades semelhantes. Com estes métodos, pretende-se minimizar o problema de pontos individuais serem erradamente filtrados, embora os seus vizinhos tenham sido bem classificados. Nestes métodos primeiro agrega-se os pontos com características semelhantes formando-se segmentos, que depois são analisados para se determinar se são “terreno” ou “não terreno”. Para cada etapa podem ser escolhidos algoritmos diferentes [Briese, 2010].

Um método representativo desta categoria foi apresentada por Tovari e Pfeifer [2005]. Os autores propõem uma segmentação dos dados baseado em técnicas de crescimento por regiões (“*region growing*”). Este método escolhe um ponto semente (*seed*) aleatoriamente e determina um conjunto de pontos na sua vizinhança. Posteriormente calcula 3 parâmetros: o vector normal do plano ajustado a esses pontos, a distância entre os pontos e o plano e a distância entre o *seed* e os seus pontos vizinhos. Enquanto os parâmetros de anexação calculados para cada ponto estiverem abaixo dos limites definidos pelo operador, os pontos vão sendo adicionados ao segmento. Após terminar o processo de segmentação, é utilizado o algoritmo “*filtering based on robust interpolation*” apresentado na secção 2.1.3, para classificar os segmentos.

2.1.5 Comparação entre algoritmos de filtragem

O desempenho prático de oito algoritmos de filtragem, representando cada uma das categorias frisadas anteriormente, foi testado num trabalho publicado por Sithole e Vosselman [2004]. Esses filtros foram aplicados em zonas de teste com diferentes características e foi elaborada uma análise quantitativa e qualitativa. O relatório concluiu que todos os algoritmos funcionam satisfatoriamente em áreas com pouca complexidade, como terreno com pouco declive, edifícios pequenos e vegetação esparsa. Identificou também falhas em todos os filtros, nomeadamente em zonas de terreno com declive acentuado, em pontes e passagens desniveladas. De forma geral

mentiona-se que os algoritmos que incorporam um conceito de filtragem por superfície apresentam melhores resultados mas ressalvam que os filtros por segmentação ainda não estavam bem desenvolvidos na época do estudo.

As tendências futuras indicadas foram a utilização combinada de várias categorias de algoritmos e a utilização de mais informação para o processo de classificação. A informação geométrica (utilizada por todos os filtros) é insuficiente para caracterizar o terreno, sendo necessário incluir dados de outros sensores ou mais informação do mesmo. Os novos sistemas *Full-Waveform*, já permitem determinar todos os ecos de um objecto em pós-processamento, assim como as características de cada eco como a amplitude e a largura [Pfeifer e Mandlbürger, 2008].

Briese [2010], sugere que uma extracção à priori de edifícios, antes de se aplicar o filtro em causa, pode melhorar os resultados obtidos.

Embora hoje em dia o processo de filtragem automática seja bastante utilizado para produzir um MDT, devido à complexidade do terreno é normalmente necessário efectuar uma edição manual para corrigir falhas, principalmente em áreas urbanas [Briese, 2010].

2.1.6 Reconstrução morfológica baseada em dilatações geodésicas sucessivas

O algoritmo *reconstrução morfológica baseado em dilatações geodésicas sucessivas*, desenvolvido por Arefi e Hahn [2005], Arefi et al. [2007] e Arefi et al. [2010], foi o algoritmo de filtragem que esteve na base da construção do MDT LiDAR nesta dissertação.

Este algoritmo foi escolhido por apresentar as seguintes características:

- (1) Responde às indicações sugeridas no estudo de comparação de algoritmos de filtragem para limitar as falhas apontadas, secção 2.1.5, nomeadamente no que se refere à utilização conjunta de filtros de duas categorias diferentes: morfológicos e filtros baseados em segmentação. A técnica de classificação possui uma base de morfologia matemática, aplicada a segmentos de pontos com características comuns.
- (2) Ao contrário dos vários algoritmos identificados em 2.1.1, os seus resultados não estão dependentes do tamanho e da forma do EE utilizado, o que constituía uma grande limitação dessa categoria de filtros. O conceito deste filtro, como se verá adiante, consiste na utilização de um EE de tamanho fixo e

isotrópico que é aplicado sucessivamente por dilatações geodésicas até se atingir a estabilidade.

- (3) Neste algoritmo também não é necessário aplicar uma operação frequente em filtros morfológicos que é o *threshold* (ou filtragem) dos resultados finais. Isto porque a morfologia clássica, por depender do EE, tende a classificar pontos abaixo dos pontos terreno verdadeiros e por conseguinte, necessita de operar um *threshold* para corrigir essa situação. Este algoritmo, por ser baseado na conectividade em vez do EE, produz uma superfície ao nível do solo não sendo necessário realizar esse *threshold*.
- (4) O filtro aplica-se em dados organizados segundo uma estrutura matricial raster, o que corresponde aos dados de trabalho fornecidos.

De seguida vai-se apresentar o conceito da reconstrução morfológica (RM) baseada em dilatações geodésicas sucessivas, as vantagens da morfologia geodésica em relação à morfologia clássica e o algoritmo sugerido pelos autores.

2.1.6.1 Conceito

A reconstrução morfológica baseada em operações geodésicas, utiliza duas imagens, a máscara e o marcador, sendo a definição do EE irrelevante. Ambas as imagens tem que ter o mesmo tamanho e a máscara tem que ter obrigatoriamente valores de intensidade iguais ou superiores ao marcador.

Nas dilatações geodésicas, o marcador é dilatado por um EE elementar e isotrópico e o resultado final desse marcador tem que permanecer inferior à máscara. Isto significa que a máscara funciona como o limite para as dilatações do marcador. A dilatação geodésica de tamanho 1, com o marcador (J) e a máscara (I), é definida por Vincent [1993]:

$$\delta_I^{(1)}(J) = (J \oplus B) \wedge I \quad (1)$$

Nesta equação \wedge indica o limite da dilatação representada por $J \oplus B$, e B é o EE isotrópico e elementar a aplicar a J. A dilatação geodésica aplicada a imagens de cinzentos de tamanho $n \geq 0$, é então fornecida por:

$$\delta_I^{(n)}(J) = \underbrace{\delta_I^{(1)} \circ \delta_I^{(1)} \circ \dots \circ \delta_I^{(1)}}_n(J) \quad (2)$$

As equações 1 e 2, definem a reconstrução morfológica por dilatações geodésicas da máscara I a partir do marcador J. A reconstrução desejada é obtida aplicando dilatações geodésicas sucessivas até se atingir a estabilidade [Vincent, 1993].

Conforme se pode verificar na Figura 10, a reconstrução morfológica consiste em sucessivas dilatações da imagem marcador (a azul), até que o contorno da imagem marcador se ajuste à imagem da máscara (a vermelho). Como se pode verificar, os “picos” da imagem marcador dilatam-se em várias direcções. Cada dilatação sucessiva é forçada a permanecer sob a máscara, terminando o processo quando as dilatações sucessivas deixarem de alterar a imagem do marcador.

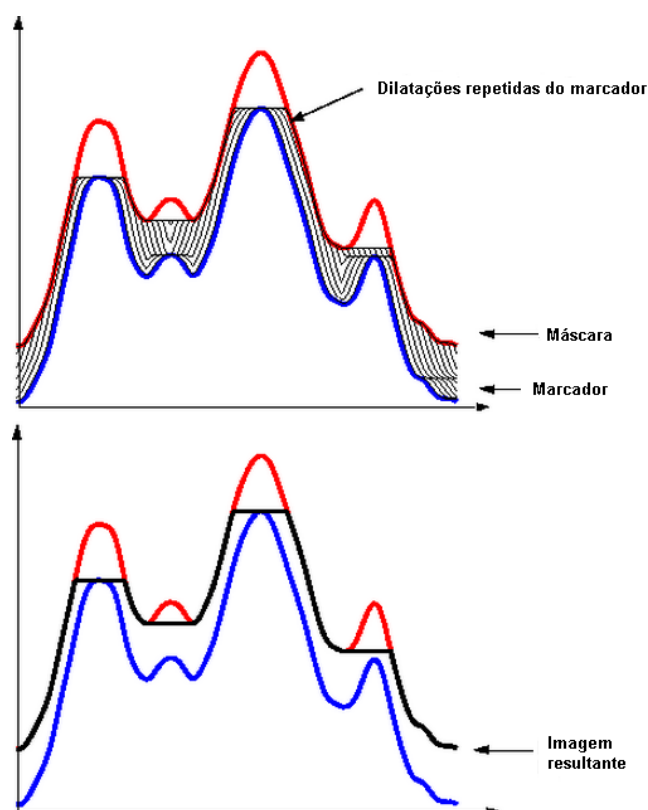


Figura 10 – Conceito da reconstrução morfológica por dilatações geodésicas sucessivas
Fonte: Adaptado de Matlab [2013a]

2.1.6.2 Morfologia geodésica versus morfologia clássica

A reconstrução morfológica baseada em dilatações geodésicas apresenta características únicas quando comparada com as operações morfológicas clássicas. Primeiro são utilizadas duas imagens durante o processo em vez de uma imagem e um EE. Depois, o processo é repetido até se atingir a estabilidade, ou seja, até a imagem marcador não se alterar mais e por último, o procedimento baseia-se na

conectividade em vez de num elemento estruturante. Desta forma a escolha do EE (orientação, tamanho e forma) deixa de ser relevante.

Devido ao facto de uma das bases de funcionamento da morfologia geodésica ser a conectividade, os seus resultados vão ser substancialmente diferentes quando comparados com os resultados da morfologia clássica. Quando se subtrai os resultados de ambas as técnicas com a imagem original (máscara), operação denominada por *TopHat*, identificaram-se as seguintes diferenças [Arefi e Hahn, 2005]:

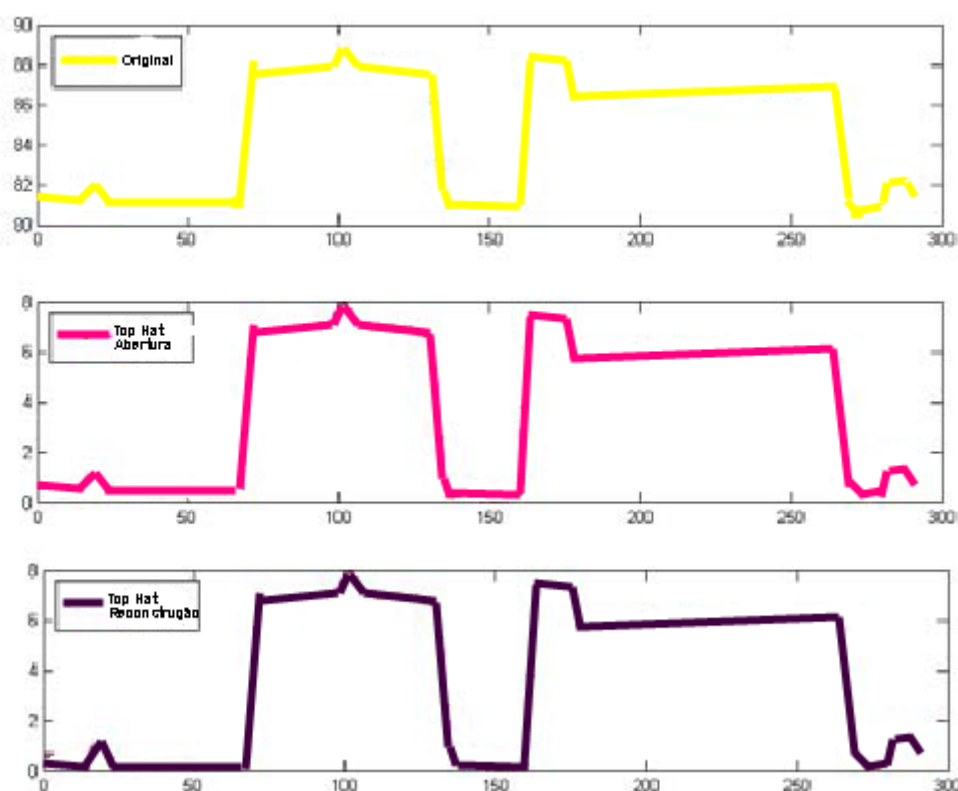


Figura 11 – Diferenças nos resultados de TopHat, entre a morfologia clássica (imagem central) e a morfologia geodésica (imagem inferior).
Fonte: Adaptado de Arefi e Hahn [2005]

Na Figura 11, a primeira imagem representa a original, a do meio representa o *TopHat* por morfologia clássica (abertura morfológica) utilizando-se um filtro de 100 por 100 pixels e a última represente o *TopHat* por morfologia geodésica (reconstrução). Pode-se verificar que a abertura morfológica tende a produzir uma superfície que se localiza acima dos pontos terreno, localizando-se esporadicamente próximo do nível zero. Por outro lado, a morfologia geodésica produz uma superfície ao nível zero para os pontos “terreno”, separando-se assim os pontos “não terreno” de forma natural. Nessa superfície os pontos com valores superiores a zero, tem posteriormente que ser analisados e classificados tendo em consideração o declive do terreno e outras características.

2.1.6.3 Algoritmo

O algoritmo proposto está apresentado na Figura 12, onde as operações de segmentação se estendem até ao ponto (5) e as de classificação até ao ponto (9).

A sequência do algoritmo é a seguinte:

- (1) Criar a imagem máscara (I). Esta imagem são os dados LiDAR que foram previamente tratados e organizados num raster.
- (2) Criar a imagem marcador (J). Os marcadores são obtidos subtraindo uma constante à máscara. De forma a se evitar problemas causados por selecções incorrectas de marcadores, os autores propõem que se utilizem uma sequência de vários marcadores.
- (3) Executar a reconstrução morfológica de acordo com as equações 1 e 2.
- (4) Calcular o nMDS, subtraindo os resultados obtidos à máscara, e binarizar o resultado.
- (5) Segmentar a imagem em regiões, seleccionando todos os pontos do nMDS superiores a zero. Desta forma obtém-se a primeira classificação de pontos “não terreno”.
- (6) Calcular para as regiões segmentadas previamente, o valor da variação local da fronteira (N). Para determinar esse valor, subtraem-se o valor máximo e mínimo dos pixéis de uma janela de dimensão 3x3, que se move ao longo da fronteira. Depois, utilizando um indicador estatístico, como a média, associa-se um valor ‘N’ a cada região.
- (7) Classificar definitivamente as regiões “não terreno” que apresentem um valor N superior ao mínimo estabelecido pelo utilizador ($N > \text{mínimo}$).
- (8) Repetir o processo para todos os marcadores previstos.
- (9) Remover todas as regiões classificadas como “não terreno” da máscara e interpolar essas zonas de forma a se obter o MDT final.

Realça-se o facto de todas as etapas que decorrem desde a criação da imagem marcador até à classificação final das regiões como “não terreno”, são repetidas para todos os marcadores. No final, é calculada uma interpolação espacial apenas com os pontos identificados como “terreno”, obtendo-se assim o MDT pretendido.

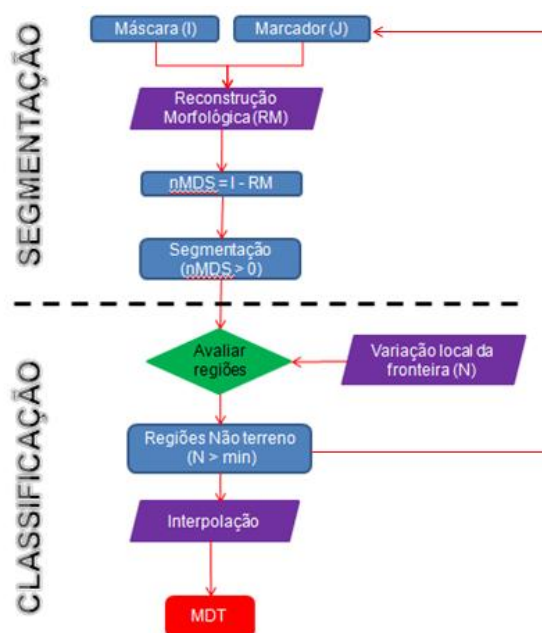


Figura 12 – Algoritmo implementado

2.2 Técnicas de extracção de edifícios

Inicialmente, o objectivo era apenas tentar implementar o algoritmo apresentado em 2.1.6 para se obter o MDT LiDAR. Face aos resultados obtidos, procurou-se melhorar o algoritmo usado, acrescentando técnicas de extracção de edifícios à priori como sugerido por Briese [2010], na secção 2.1.5.

Segundo Brenner [2010], a detecção de edifícios é uma operação de classificação que separa os edifícios do solo natural ou artificial (como relva e estradas) e da vegetação (como os arbustos e as árvores). Das conclusões do estudo apresentado pelo autor sobre os métodos utilizados para realizar a detecção de edifícios, realçam-se os seguintes tópicos:

- (1) Os critérios utilizados na detecção de edifícios com resultados mais satisfatórios são: diferença entre a altura mínima e máxima dentro de uma janela, ou *variação local* (apresentada no ponto(6) da secção 2.1.6.3) e a análise da textura efectuada com o operador *Sobel* e *Laplace*.
- (2) A utilização de múltiplos ecos, disponibilizada recentemente pelos sistemas LiDAR mais recentes, contribuem para a melhoria dos resultados. Uma das características das árvores é grandes diferenças entre o 1º e o último eco.
- (3) Embora a utilização de informação multiespectral possa ser útil, a sua disponibilidade assume-se como um problema. Como alternativa, sugere-se a

utilização de sistemas que proporcionam densidades de pontos superiores ou o registo de múltiplos ecos ou a análise da *full-waveform*.

- (4) A detecção de edifícios deve ser realizada em níveis diferentes: do ponto/pixel, da vizinhança local e baseado em regiões segmentadas com características semelhantes.

Uma vez que com os dados fornecidos não é possível realizar a análise enumerada nos pontos (2) e (3), utilizou-se apenas os conceitos referidos em (1) e (4) para construir um operador para detectar os principais objectos presentes nos dados originais. Dos vários critérios sugeridos, falta apenas apresentar os filtros derivativos digitais de análise de imagens *Sobel* e *Laplaciano*, aplicados em técnicas de filtragem espacial de imagens.

A filtragem espacial de imagens pode-se definir como um processo onde o valor dos tons de cinzento de cada pixel de uma imagem é modificado em função dos tons de cinzento dos pixéis da sua vizinhança. A vizinhança que vai ser utilizada na determinação do novo valor é definida por uma sub-imagem denominada por máscara, janela ou *kernel* [Soares, 2011].

Consoante o efeito produzido pelos filtros, estes podem ser caracterizados como filtros passa-baixa ou filtros passa-alta. Nas próximas secções vão ser apresentados os filtros utilizados nesta dissertação para detectar edifícios.

2.2.1 Filtro *passa-baixa*

Estes filtros suavizam as imagens originais, atenuando as altas frequências que correspondem a transições abruptas (zonas de fronteira radiométrica e os detalhes). O resultado da aplicação destes filtros é a minimização do ruído das imagens e um efeito de desfocagem. Estes filtros caracterizam-se por terem todos os coeficientes da máscara com coeficientes positivos, devendo a sua soma ser igual a um. Existem vários tipos de filtros representativos desta categoria, como a média e o filtro gaussiano a duas dimensões (2D).

A média representa uma forma simples do filtro linear passa-baixa e caracteriza-se por todos os seus coeficientes serem iguais. Assim, calcula-se a média dos tons de cinzento no interior da máscara e substitui-se o pixel central da janela por esse valor [Soares, 2011].

O gaussiano 2D, é um filtro semelhante à média, mas que utiliza uma máscara diferente, representada por uma “bossa” gaussiana em forma de sino. Este filtro

desfoca a imagem, sendo o grau de suavização determinado pelo desvio padrão (σ) da função Gauss descrita na equação 3, [Soares, 2011]:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

O filtro gaussiano tem como resultado uma média ponderada da vizinhança de cada pixel, como maior peso aplicado ao pixel central e depois diminuindo sucessivamente para o exterior. Os efeitos práticos desta característica é uma maior preservação das fronteiras dos objectos, relativamente ao filtro da média, como ilustra a Figura 13.

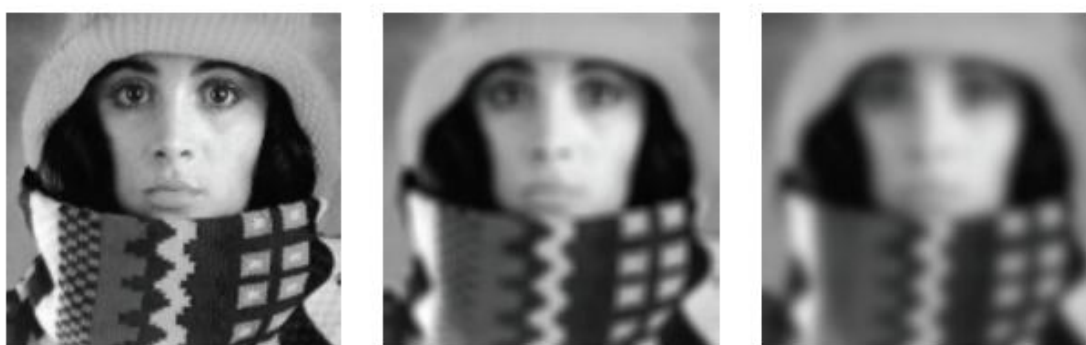


Figura 13 – Diferenças entre o filtros passa-baixas: imagem da esquerda é a original, a do centro é o resultado do filtro gaussiano e a da direita o resultado do filtro da média.

Fonte: [Soares, 2011]

2.2.2 Filtro *passa alta*

Este tipo de filtros atenuam ou eliminam as baixas frequências da imagem, formadas por variações lentas no nível médio de cinzento, tornando mais nítidas as fronteiras radiométricas e os detalhes. Caracterizam-se por terem coeficientes positivos na vizinhança do centro e negativos na periferia, sendo o somatório dos coeficientes igual a zero [Soares, 2011].

Estes filtros derivativos baseiam-se na diferenciação para identificar as fronteiras radiométricas de uma imagem (função de duas dimensões). A função gradiente (∇), é expressa da seguinte forma:

$$\nabla A(x, y) = \left(\frac{\partial A}{\partial x}, \frac{\partial A}{\partial y} \right) \quad (4)$$

Onde:

- $A(x, y)$ é a função imagem
- $\left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)$ é a derivada parcial em relação ao eixo das abcissas

- $\left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)$ é a derivada parcial em relação ao eixo das ordenadas

As derivadas parciais em x e y, calculam-se com as equações 5 e 6, respectivamente:

$$\nabla A_x(x, y) = \frac{A(x, y) - A(x - 1, y)}{\partial x} \quad (5)$$

$$\nabla A_y(x, y) = \frac{A(x, y) - A(x, y - 1)}{\partial y} \quad (6)$$

A magnitude do gradiente (G_{mag}) é uma operação isotrópica::

$$G_{\text{mag}} = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2} \quad (7)$$

Como esta operação envolve uma raiz quadrada e duas potências de dois, torna-se computacionalmente lenta. Assim, a determinação da magnitude resume-se ao cálculo da soma:

$$G_{\text{mag}} \approx \left| \frac{\partial A}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial A}{\partial y} \right| \quad (8)$$

A aproximação mais simples que se pode fazer ao cálculo da magnitude do gradiente é:

$$G_{\text{mag}} \approx |A(x, y) - A(x - 1, y)| + |A(x, y) - A(x, y - 1)| \quad (9)$$

As quais podem ser representadas pela máscara 2x2:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Cada filtro derivativo representa uma aproximação diferente da magnitude do gradiente e, conseqüentemente, tem uma máscara diferente. Os filtros, consoante o tipo de derivadas que utilizem, são classificados como filtros derivativos de 1ª ou 2ª ordem. Exemplos dos primeiros são os filtros *Sobel*, *Prewitt* e *Roberts*. O filtro Laplaciano é de 2ª ordem.

Enquanto que os filtros derivativos baseados na 1ª derivada, determinam a presença de uma fronteira quando o resultado da magnitude do gradiente é superior a um determinado limite (originando fronteiras muito espessas), os outros localizam os

pontos máximos do gradiente. Como um pico na 1ª derivada corresponde a um cruzamento por zero na 2ª derivada, as fronteiras podem ser identificados com recurso a um detector de cruzamentos por zero, Figura 14.

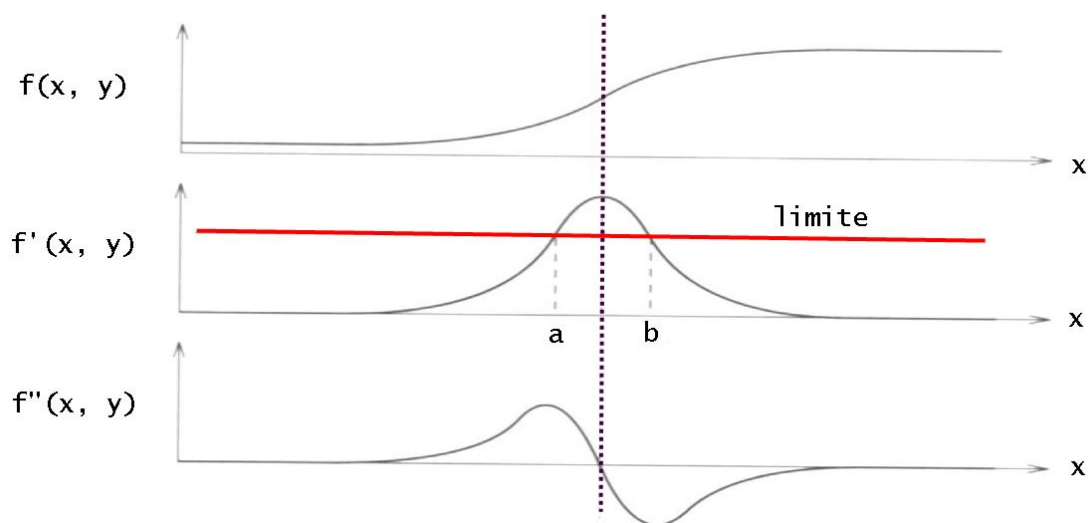


Figura 14 – Diferenças entre filtros derivativos de 1ª ordem e de 2ª ordem

O operador *Sobel*, representado por uma máscara 3x3, é definido simplifadamente na direcção x e y, pelas equações 10 e 11:

$$\nabla A_x(x, y) = A(x, y) - A(x - 1, y) \quad (10)$$

$$\nabla A_y(x, y) = A(x, y) - A(x, y - 1) \quad (11)$$

Sendo a sua máscara:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

O operador Laplaciano representado por uma máscara 3x3, é definido simplifadamente pelas equações 12 e 13:

$$\nabla^2 A_x(x, y) = A(x, y + 1) - 2A(x, y) + A(x, y - 1) \quad (12)$$

$$\nabla^2 A_y(x, y) = A(x + 1, y) - 2A(x, y) + A(x - 1, y) \quad (13)$$

Sendo a sua máscara:

$$G_{\text{mag}} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Todos os filtros derivativos são muito sensíveis ao ruído das imagens. É normal aplicar-se um processo de filtragem para melhorar a resposta do filtro detector de fronteiras através de um dos filtros passa-baixa referidos anteriormente. Quando se aplica essa filtragem, tem que se ter em consideração que quanto maior for, menor será a definição das fronteiras dos objectos.

2.3 Técnicas de interpolação

Após classificar a nuvem de pontos LiDAR, falta realizar a interpolação do MDT com base nos pontos “terreno”. Como normalmente o número de pontos e a sua densidade são elevados, não é necessário utilizar os melhores métodos, mas sim os que necessitem de menos recursos computacionais [Pfeifer e Mandlbürger, 2008].

Segundo Meng *et al.* [2010], os resultados de vários estudos desenvolvidos nesta área concluem que a interpolação pela técnica do vizinho mais próximo apresenta os erros mais elevados, e que o método de Kriging ordinário mostrou resultados inferiores aos métodos bilinear e cubico, principalmente em áreas urbanas.

Assim sendo, a técnica de interpolação nesta dissertação foi a técnica bilinear. Esta técnica usa um algoritmo de interpolação bilinear, que é uma extensão da interpolação linear para funções com duas variáveis. O método realiza primeiro a interpolação linear na direcção das abcissas e depois na direcção das ordenadas.

O interpolador linear entre dois pontos de coordenadas conhecidos, $P_0 = (x_0, y_0)$, $P_1 = (x_1, y_1)$, é dada por:

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (14)$$

Onde o valor desconhecido (y) é:

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (15)$$

A interpolação bilinear do valor desconhecido da função no ponto $P(x,y)$, Figura 15, com base em quatro pontos de coordenadas conhecidas $Q_{11} = (x_1, y_1)$, $Q_{12} = (x_1, y_2)$, $Q_{21} = (x_2, y_1)$ e $Q_{22} = (x_2, y_2)$ é calculada em três fases, com base na equação 15.

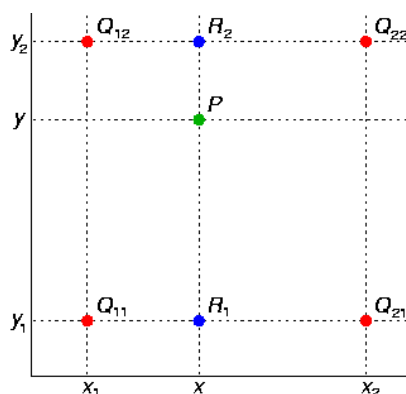


Figura 15 – Os pontos vermelhos são pontos de coordenadas conhecidas e o ponto verde é o ponto que se pretende interpolar
Fonte: [Wikipédia, 2013b]

Primeiro calcula-se a primeira interpolação ao longo do eixo das abcissas:

$$f(R_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}), \text{ onde } R_1 = (x, y_1) \quad (16)$$

Depois calcula-se a segunda interpolação ao longo do eixo das abcissas:

$$f(R_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22}), \text{ onde } R_2 = (x, y_2) \quad (17)$$

Por último determina-se a interpolação ao longo do eixo das ordenadas:

$$f(P) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(R_2), \text{ onde } P = (x, y) \quad (18)$$

2.4 Técnicas de avaliação da qualidade do MDT LiDAR

Segundo Pfeifer e Mandlbürger [2008], a qualidade do MDT obtido a partir de dados LiDAR depende de três factores principais:

- (1) A qualidade da nuvem de pontos original;
- (2) A qualidade da filtragem;
- (3) A qualidade da interpolação.

A avaliação geral da qualidade do MDT é difícil, porque a obtenção de pontos de controlo para grandes áreas de terreno com precisão superior aos dados LiDAR é muito dispendiosa [Meng *et al.*, 2010; Pfeifer e Mandlbürger, 2008].

Para Meng *et al.* [2010], existem três tipos de métodos para verificar a qualidade do MDT gerado. São eles a inspecção visual, o levantamento de amostras aleatórias de

pontos de controlo na área de estudo e a comparação com áreas de testes classificadas manualmente:

- (1) A inspecção visual usa-se normalmente quando não existe um levantamento no terreno de pontos de controlo. Com esta técnica consegue-se identificar facilmente erros óbvios, no entanto, depende sempre do operador que a efectua. Alguns investigadores complementam a interpretação visual com outros dados que auxiliem essa tarefa;
- (2) As amostras aleatórias de pontos de controlo na área de estudo, tem como desvantagem o facto de a sua densidade e localização não representarem convenientemente toda a área;
- (3) A alternativa a estas abordagens é seleccionar uma pequena área de estudo e classificar manualmente todos os pixéis em “terreno” e “não terreno”, usando para tal a interpretação visual do local e imagens aéreas. Esta é a melhor forma de avaliar a qualidade do MDT, mas raramente é utilizada por ser extremamente demorado a construção destas áreas classificadas manualmente, pixel a pixel.

2.5 Software MATLAB®

O *software* utilizado neste capítulo para produzir o MDT LiDAR foi o Matlab® (MATrix LABoratory – Laboratório de Matrizes), produzido pela empresa The MathWorks®. Este programa é especializado em cálculos científicos e de engenharia, na visualização de dados e numa programação em ambiente “amigo” do utilizador.

O *software* utiliza a linguagem MATLAB e disponibiliza uma grande biblioteca de funções que facilita a sua aplicação em áreas como o processamento digital de imagens, sinais, cálculo numérico, análise de dados, visualização de gráficos, entre outros. O MATLAB® permite resolver problemas técnicos de computação, principalmente os relacionados com matrizes e vectores, de forma muito mais fácil e rápida do que noutras linguagens de computação como o *FORTRAN* ou *C* [Matlab, 2013b].

A facilidade do uso aliada à enorme panóplia de funções predefinidas na área do processamento digital de imagens, foram os principais critérios de selecção do mesmo para implementar o algoritmo de reconstrução morfológica baseada em dilatações geodésicas sucessivas.

2.6 Execução e resultados

Face à dimensão da área de estudo, foi necessário seleccionar uma região com dimensões reduzidas para testar a implementação do algoritmo, de forma a ser computacionalmente menos exigente e permitir uma rápida visualização dos testes efectuados. Para tal foi seleccionada uma região de dimensões 500x500m, localizada no Bairro do Alto do Pina, e que se caracteriza por possuir edifícios de diversas alturas assim como vegetação dispersa por toda a área, Figura 16. Essa imagem é a denominada máscara durante o processamento do algoritmo.



Figura 16 – Área de testes do algoritmo de classificação dos dados LiDAR

Nas próximas secções serão apresentados os testes realizados para implementar o algoritmo de reconstrução morfológica por dilatações geodésicas sucessivas e as alterações introduzidas com a remoção de edifícios à priori para melhorar os resultados obtidos. Por fim é discutida a qualidade geral do MDT LiDAR calculado.

2.6.1 Algoritmo sem extracção à priori de edifícios

O primeiro passo, após se determinar a imagem da máscara, foi obter a sequência de marcadores. Neste algoritmo, como já foi dito anteriormente, foi utilizada uma sequência de marcadores com alturas diferentes em relação à imagem inicial de forma a eliminar os erros da utilização de apenas um marcador com uma altura pré-definida. Assim, cada marcador foi calculado de acordo com a equação 19:

$$J = I - h * n \quad (19)$$

Onde:

- h representa o valor constante a subtrair à máscara.
- n representa o número da iteração.
- $h * n$ representa o *offset* utilizado para cada marcador.

A determinação do valor h é importante para os resultados finais obtidos como se pode verificar na Figura 10. O objectivo nesta fase foi determinar um valor h que permitisse um compromisso entre o número de objectos identificados e o tempo de processamento necessário. Como se pode verificar na Tabela 1, a utilização de marcadores com diferenças sucessivas de 5 e 10m, embora apresentem excelentes resultados ao nível do tempo de processamento utilizado (por necessitarem de menos iterações), revelaram-se insuficientes na classificação de alguns objectos “não terreno”. Por outro lado, a utilização de marcadores com diferenças de 1 e 2m apresentaram resultados semelhantes na classificação de objectos. Como o consumo de recursos utilizado pela opção de $h = 2m$ foi 200,8% mais eficiente que a $h = 1m$, adoptou-se esta opção.

Tabela 1 – Diferentes imagens marcadores utilizados.

	<i>Diferença entre marcador</i>			
	$h = 1m$	$h = 2m$	$h = 5m$	$h = 10m$
Tempo processamento (segundos)	810,3	403,5	164,4	84,5
Análise visual dos objectos “não terreno” classificados	Positiva	Positiva	Média	Insuficiente

O número de iterações utilizadas pelo algoritmo é determinada automaticamente, dependendo da maior variação de alturas local presente nos dados. Assim, calculou-se a variação local da fronteira, para todos os pixéis da imagem de teste, com a função da “*rangefilt*” da biblioteca de funções do MATLAB®, cujo conceito de funcionamento já foi apresentada no ponto (6) da secção 2.1.6.3. Como para esta área de testes o valor máximo de variação local foi 62.23m, foram usados 31 marcadores diferentes com uma amplitude de 2 metros, oscilando entre os 2 e os 62 metros.

Posteriormente, foi processada a reconstrução morfológica baseada em dilatações geodésicas sucessivas, apresentada na secção 2.1.6.1, com a função “*imreconstruct*” do MATLAB®. O impacto de se utilizarem diferentes marcadores é mostrado na Figura 17, que representa os objectos “não terreno” provisoriamente identificados pela reconstrução morfológica para cada marcador, ao longo do processamento do algoritmo.

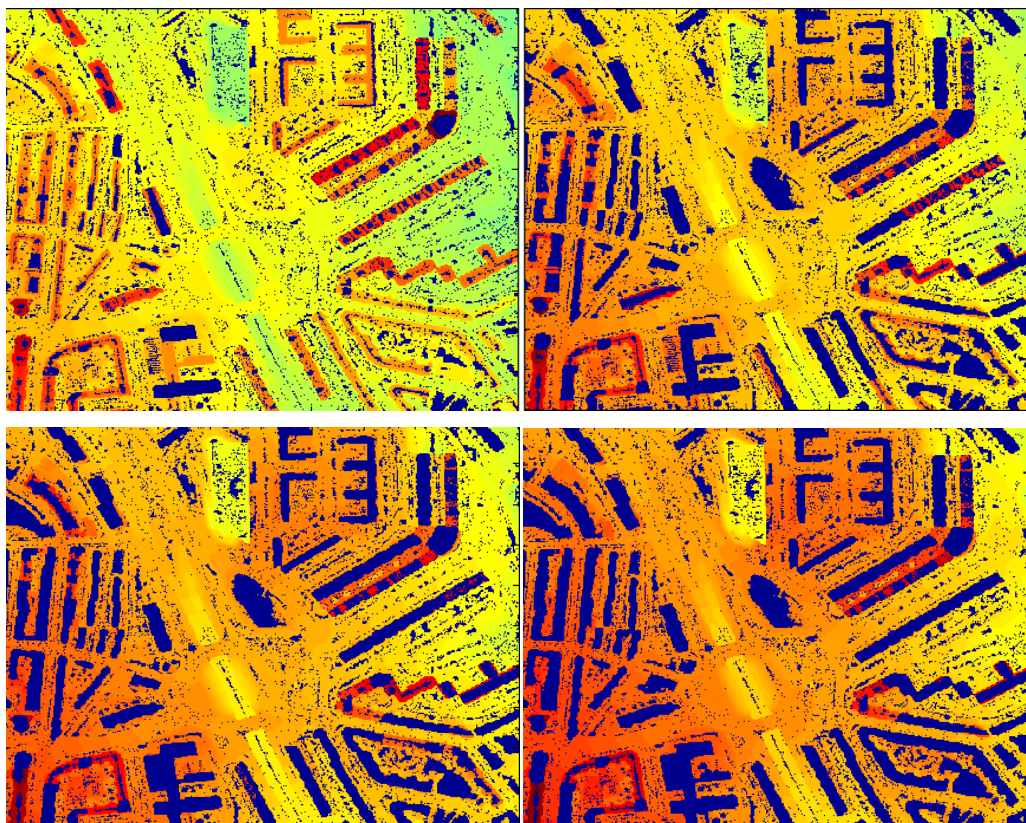


Figura 17– Regiões classificadas como “não terreno” a azul, utilizando diferentes imagens marcador (J) no algoritmo. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: J=I-2; J=I-6; J=I-10; J=I-14.

Para pequenos *offsets*, apenas se identificam regiões “não terreno” relativamente pequenas e baixas. Muitas vezes estas regiões representam apenas o topo dos edifícios. Aumentando os valores dos *offsets*, as regiões classificadas vão sendo sucessivamente maiores, até representarem o objecto pelo seu limite. Assim, com uma sequência de marcadores completa é possível classificar as várias regiões “não terreno” pela sua máxima descontinuidade ao longo da sua fronteira, uma vez que estas vão aumentando sucessivamente de tamanho em cada dilatação até a imagem marcador deixar de se alterar.

De seguida calcula-se o MDS normalizado (*nMDS*). Esta imagem obtém-se com a equação 20:

$$nMDS = I - RM \quad (20)$$

Onde:

- *I* representa a máscara.
- *RM* representa o resultado da aplicação da reconstrução morfológica entre a máscara e o marcador.

A Figura 18 – Esquerda, ilustra o resultado do MDS normalizado para um marcador com *offset* de 2m.

A primeira fase do algoritmo termina com uma classificação provisória de objectos “não terreno” do *nMDS*, através de uma operação de binarização. Para tal, foi utilizada a função *im2bw* para classificar os pixéis com valor superior a zero (que de acordo com o apresentado na secção 2.1.6.2 correspondem a objectos acima do solo), Figura 18 – Centro.

A segunda fase do algoritmo consiste em analisar e classificar as regiões provisoriamente identificadas como “não terreno”. Para realizar este passo identificaram-se as fronteiras das regiões com a função “*bwboundaries*”, Figura 18 - Direita. Posteriormente, determinou-se o valor da variação média local de cada pixel da fronteira da região com a função “*rangefilt*” e definiu-se o critério de avaliação:

“Mais de 90% dos pixéis da fronteira da região com variação média local, igual ou superior a 50cm”.



Figura 18 – Esquerda: Imagem do MDS normalizado (*nMDS*); Centro: Regiões formadas por conectividade dos pontos “não terreno”, obtidas após binarização do *nMDS*; Direita: Identificação da fronteira de cada região

Quando o critério for verificado, as regiões são definitivamente classificadas como “não terreno” e são guardadas como um resultado parcial para este primeiro marcador (*offset* = 2m), Figura 19.

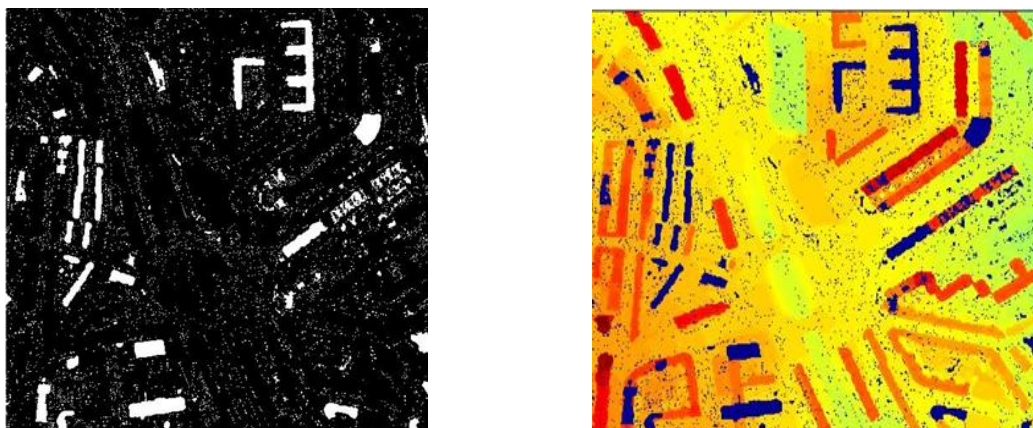


Figura 19 – Regiões classificadas como “não terreno”, a branco (esq.) e a azul (dir.) para um marcador com offset=2m.

Como se pode verificar na Figura 19, nem todas as regiões identificadas na Figura 18 satisfizeram os requisitos definidos, sendo apenas um pequeno conjunto classificado como “não terreno”. Isto acontece porque à medida que os offsets vão aumentando, também a área dos objectos analisados vai sendo sucessivamente maior. Desta forma cada objecto “não terreno” só é classificado como tal, quando houver uma iteração que evidencie o seu máximo desnível em relação à sua vizinhança.

Este processo é iterativo, só terminando quando se processarem os 31 marcadores. O produto final é uma imagem que compila todas as regiões classificadas como “não terreno”, Figura 20 – Esquerda.

Da comparação visual entre a imagem resultante da classificação (Figura 20 – Esquerda), com a imagem original (Figura 20 – Centro) identificaram-se algumas falhas. Com um rectângulo cor-de-rosa estão sinalizadas zonas “terreno” erradamente classificadas como “não terreno”. Essas zonas caracterizam-se por serem contíguas a obstáculos (edifícios) com desníveis acentuados. Embora essas áreas de terreno não satisfaçam o critério de classificação, o facto de serem erradamente avaliadas como partes integrantes de edifícios, faz com que a região no conjunto tenha um desnível que passe no critério de classificação.

A preto está identificada uma zona de aterro que, não sendo um objecto, não deveria ser classificada como “não terreno”, no entanto, essa zona satisfaz o critério de classificação. A verde estão assinaladas duas áreas que correspondem a patamares anexos a edifícios e que não foram correctamente classificadas. O facto de serem áreas desniveladas faz com que o critério de classificação não seja cumprido.

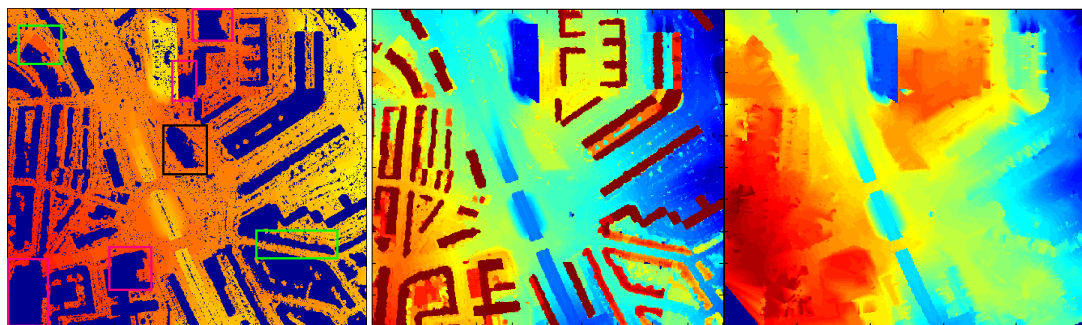


Figura 20 – Esquerda: Regiões classificadas como “não terreno” no final; Centro: Imagem original; Direita: MDT produzido.

A última fase do algoritmo proposto consiste em interpolar a imagem máscara inicial sem as zonas classificadas como “não terreno”. A função utilizada foi a “*griddata*” com a opção “*linear*”, que utiliza o método de interpolação bilinear apresentado na secção 2.3. O MDT gerado, Figura 20 – Direita, apresenta algumas transições menos suaves que se devem a uma extracção incompleta de alguns pontos “não terreno” adjacentes a edifícios e que “contaminam” a interpolação espacial nessas zonas.

Face aos resultados obtidos, decidiu-se melhorar a qualidade da classificação da nuvem de pontos e introduziu-se a extracção à priori de edifícios, conforme sugerido por Briesse [2010], na secção 2.1.5.

2.6.2 Algoritmo com extracção à priori de edifícios

O algoritmo de extracção de edifícios utilizado nesta dissertação tem como princípios as conclusões apresentadas por Brenner [2010], no estudo que realizou sobre algoritmos de detecção de edifícios (na secção 2.2). Assim, os critérios de classificação aqui implementados foram a variação local e os operadores de análise de textura *Sobel* e *Laplace*.

Numa primeira fase deste algoritmo, a imagem inicial foi segmentada em regiões de características semelhantes com o filtro derivativo laplaciano. Depois, essas regiões foram avaliadas de acordo com a variação local da sua fronteira à semelhança do algoritmo 2.6.1. Apenas as regiões que passaram no critério de classificação foram consideradas como “não terreno”. O resultado deste método (1º MDT Provisório), é a imagem máscara utilizada depois pelo algoritmo 2.6.1. A Figura 21 representa o algoritmo proposto para a extracção de edifícios à priori.

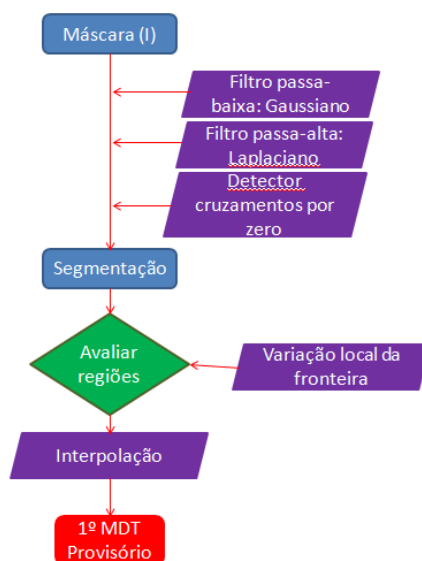


Figura 21 – Algoritmo proposto para detectar edifícios

Uma vez que para se identificar os objectos foram usados filtros derivativos (muito sensíveis ao ruído das imagens), a imagem máscara foi suavizada para eliminar o excesso de ruído que possuía. O tipo de filtro digital escolhido para eliminar as altas frequências da imagem foi o filtro passa-baixa gaussiano 2D. Este filtro, como já referido na secção 2.2.1, proporciona uma suavização mais delicada que o filtro da média e preserva as fronteiras, uma vez que resulta de uma média ponderada da vizinhança de cada pixel com maior peso para o pixel central.

A função utilizada para construir o filtro gaussiano 2D foi a “*fspecial*”. Na sintaxe desta função existem dois parâmetros que podem ser configurados. Esses parâmetros são:

- ❖ *Type*: Aqui podem ser seleccionados os vários tipos de filtros que se pretendem construir. Realça-se a opção “*Gaussian*” e a “*Laplacian*”
- ❖ *Parameters*: Os parâmetros que podem ser configuráveis dependem do tipo de filtro que está a ser construído. Para o filtro do tipo “*Gaussian*”, estas são as opções:
 - *hsize*: é um vector que especifica o número de colunas e de linhas da matriz *kernel*. Esta matriz tem que ser quadrada e por defeito, o *hsize* é [3 3].
 - *sigma*: representa o valor do desvio padrão a usar na função gauss. Quanto maior for este valor, maior será a janela de convulsão e o grau de suavização. Por defeito o valor é 0.5.

Na construção do filtro gauss foram utilizadas as opções: *hsize* [13 13] e *sigma*=2. Desta forma foi possível atingir um equilíbrio, que se considerou aceitável, entre a precisão das fronteiras dos objectos e o excesso de informação eliminado, Figura 22.

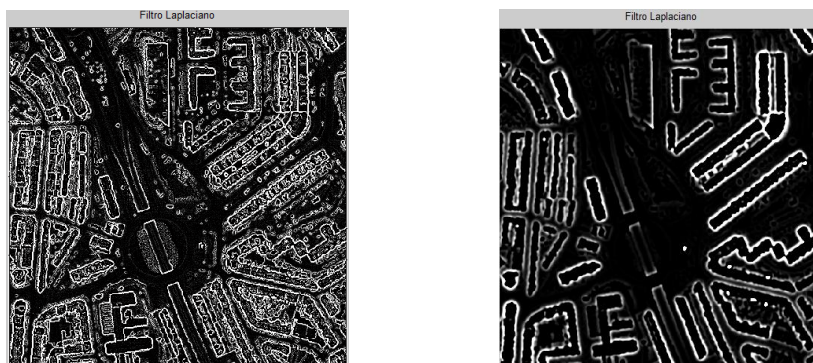


Figura 22 – Esquerda: Resultados com filtro gaussiano 2D configurado por defeito; Direita: Resultados com filtro gaussiano 2D com as opções: *hsize* [13 13] e *sigma*=2.

Após se filtrar a imagem máscara, foi construído o filtro derivativo de 2ª ordem Laplaciano com a máscara [3x3], definida na secção 2.2.2. Em qualquer dos resultados, Figura 22, as fronteiras dos objectos são definidas por um valor máximo (no início) e um valor mínimo (no fim), uma vez que um pico na 1ª derivada corresponde, para um determinado *thresh*old, a dois picos na 2ª derivada. A melhor solução para se detectar a fronteira de cada objecto é usar um detector de cruzamentos por zero, para identificar os pontos máximos do gradiente.

Para realizar este passo, utilizou-se a função “*edge*”, da biblioteca de funções do MATLAB®, que permite detectar limites em imagens de cinzentos. Na sintaxe da função o principal parâmetro que pode ser configurado é:

- ❖ *Method*: determina o método utilizado para identificar os limites. Realça-se a opção utilizada ‘*zero-cross*’:
 - *Zero-cross*: método de cruzamentos por zero de limites aplicado a um filtro. Os parâmetros configuráveis com esta opção são:
 - *Thresh*: Ao contrário dos métodos baseados na magnitude do gradiente (*Sobel*, *Roberts* e *Prewitt*) onde esta opção é usada para filtrar os valores de magnitude de gradiente pretendidos, no método *zerocross* usa-se para seleccionar os cruzamentos por zero que representem saltos grandes. Um salto pequeno no zero não é considerado como um limite. Se não for estabelecido nenhum valor, o sistema atribui um automaticamente.

- 0: Se o valor de *thresh* for zero, a imagem resultante inclui todos os cruzamentos por zeros existentes na imagem de entrada e apresenta contornos fechados.

A Figura 23 – Esquerda, ilustra os resultados do método de detecção de limites construído com a função “edge”. Como para detectar edifícios é fundamental que os limites identificados correspondam a regiões fechadas, configurou-se o *threshold* para ‘zero’ para que a imagem tenha contornos fechados, Figura 23 – Centro. Aplicando a função “*imfill*”, obtém-se a imagem segmentada por regiões, Figura 23 – Direita.

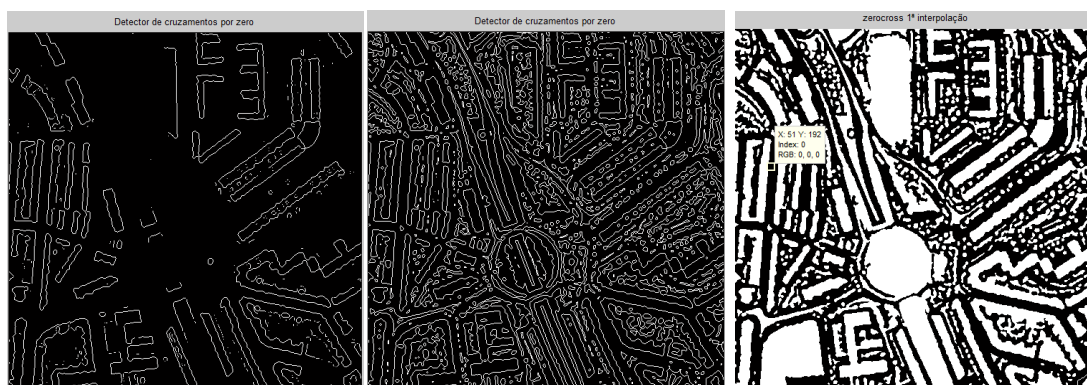


Figura 23 – Esquerda: Resultados da função *edge*; Centro: Resultados da função *edge* com contornos fechados; Direita: Regiões formadas pelos limites da função *edge*.

A segunda fase deste algoritmo consiste em avaliar as regiões com a técnica já exposta anteriormente na secção 2.6.1. Ou seja, cada região foi avaliada de acordo com a análise do critério da variação local dos pixéis que formam a fronteira. O critério definido para este caso foi ligeiramente diferente do anterior porque se pretende apenas captar os maiores objectos presentes nos dados originais:

“Mais de 70% dos pixéis da fronteira da região com variação média local, igual ou superior a 1m”.

Aplicando a técnica de interpolação bilinear nos resultados anteriores, obteve-se o 1º MDT provisório, Figura 24 - Esquerda. Verificou-se que algumas partes de edifícios ou vegetação localizada em jardins interiores não foram classificadas (sinalizadas a vermelho). Isto justifica-se pelo facto destes objectos não terem sido identificados como uma única região fechada. Aplicando-se novamente este algoritmo, todas essas lacunas foram identificadas, Figura 24 - Centro. Obteve-se assim o 2º MDT provisório corrigido de todos os objectos cuja fronteira possuía desníveis superiores a 1 metro em mais de 70% dos seus pixéis, Figura 24 – Esquerda.

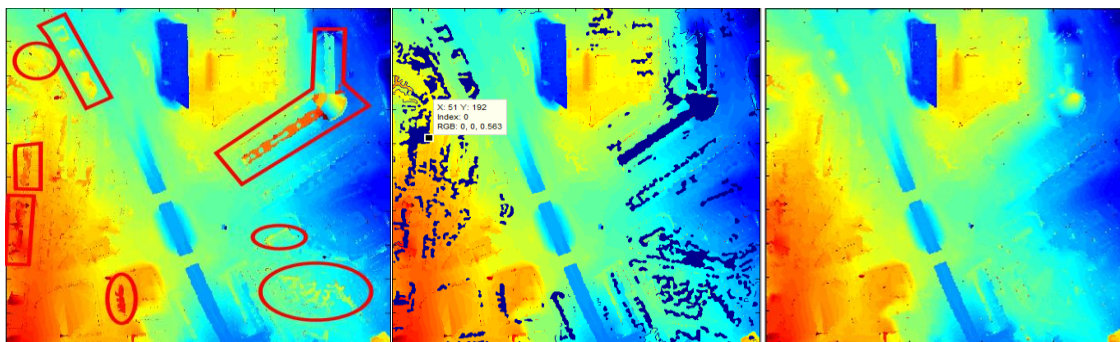


Figura 24 – Esquerda: Erros no 1ºMDT provisório; Centro: Identificação dos erros do 1ºMDT provisório; Direita: 2ºMDT provisório.

A extracção dos edifícios à priori está concluída. De seguida o 2º MDT provisório é utilizado como máscara de entrada no algoritmo reconstrução morfológica por dilatações geodésicas sucessivas, apresentado na secção 2.1.6, numa etapa denominada por 3ª fase. O objectivo é agora filtrar do MDS inicial os objectos “não terreno” de pequenas dimensões, com base na conectividade que caracteriza esse algoritmo. São exemplos vegetação, patamares de edifícios, viaturas, entre outros Figura 25 – Esquerda.

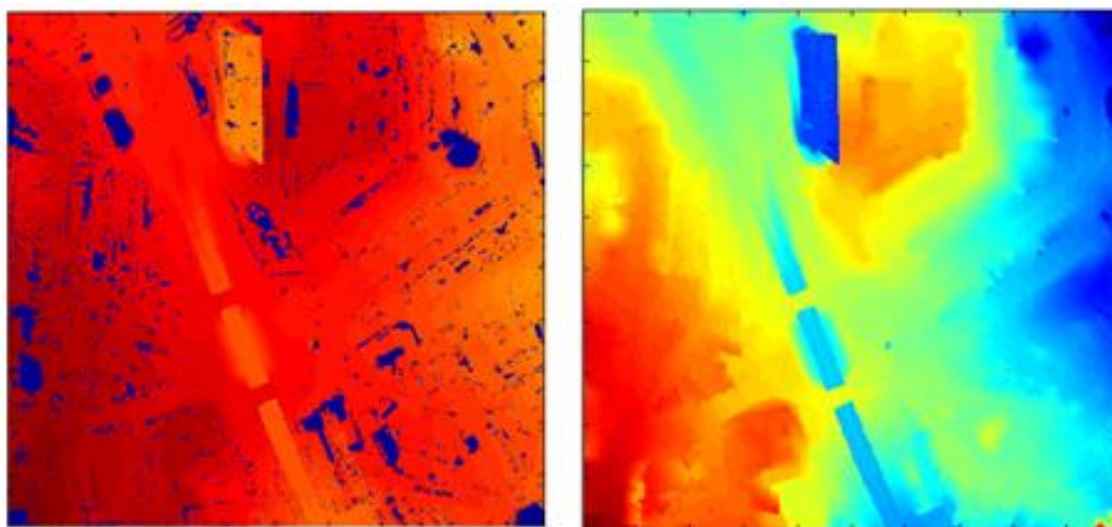


Figura 25 – Esquerdo: Regiões classificadas como “não terreno” da 3ª fase; Direito: MDT LiDAR final da área de testes.

Na Figura 25 – Direita, pode-se verificar que o resultado final interpolado é bastante harmonioso. As principais falhas apontadas à primeira versão do algoritmo de filtragem (Figura 26 – Esquerda) foram todas corrigidas no algoritmo melhorado. Na Figura 26 – Direita, estão sinalizados a vermelho os dois erros de classificação registados e que são provocados devido a zonas de terreno natural com declive acentuado ao longo da fronteira.

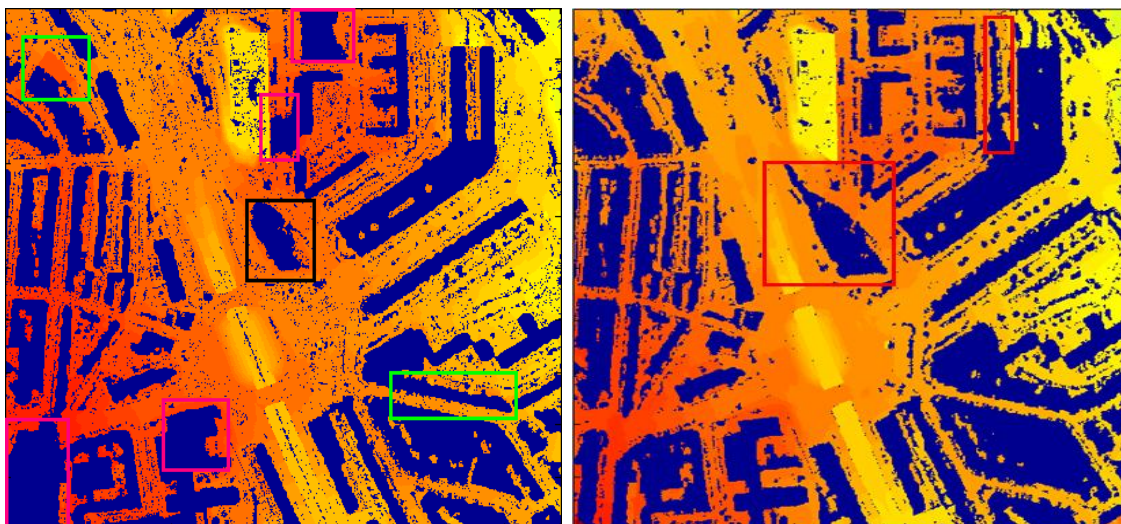


Figura 26 – Esquerdo: Falhas de classificação do algoritmo de reconstrução morfológica por dilatações geodésicas sucessivas; Direito: Falhas de classificação no algoritmo melhorado.

2.6.3 Aplicação do algoritmo à área de estudo

Após se atingirem resultados positivos na área de testes, o algoritmo foi aplicado a toda a zona de estudo. O primeiro obstáculo foi a falta de memória do computador pessoal para efectuar essa tarefa.

Ciente das dificuldades apontadas por Matos [2008] sobre o manuseamento de MDE, secção 1.1.5, foi criado nos servidores do IGeoE uma máquina virtual com Windows 7 a 64bits e 16Gb de memória RAM (*Random Access Memory*). O tempo necessário para processar os dados da área de estudo (mais de 32 milhões de pontos) foi muito superior ao inicialmente esperado, tendo mesmo sido necessário subdividir os dados iniciais em quatro subconjuntos de forma a acelerar o seu processamento. No final, somando todos os tempos parciais, o tempo de processamento contínuo no servidor excedeu os 65 dias.

A Figura 27, mostra o MDT LiDAR e a Figura 28 compila todas as zonas classificadas como “não terreno”.

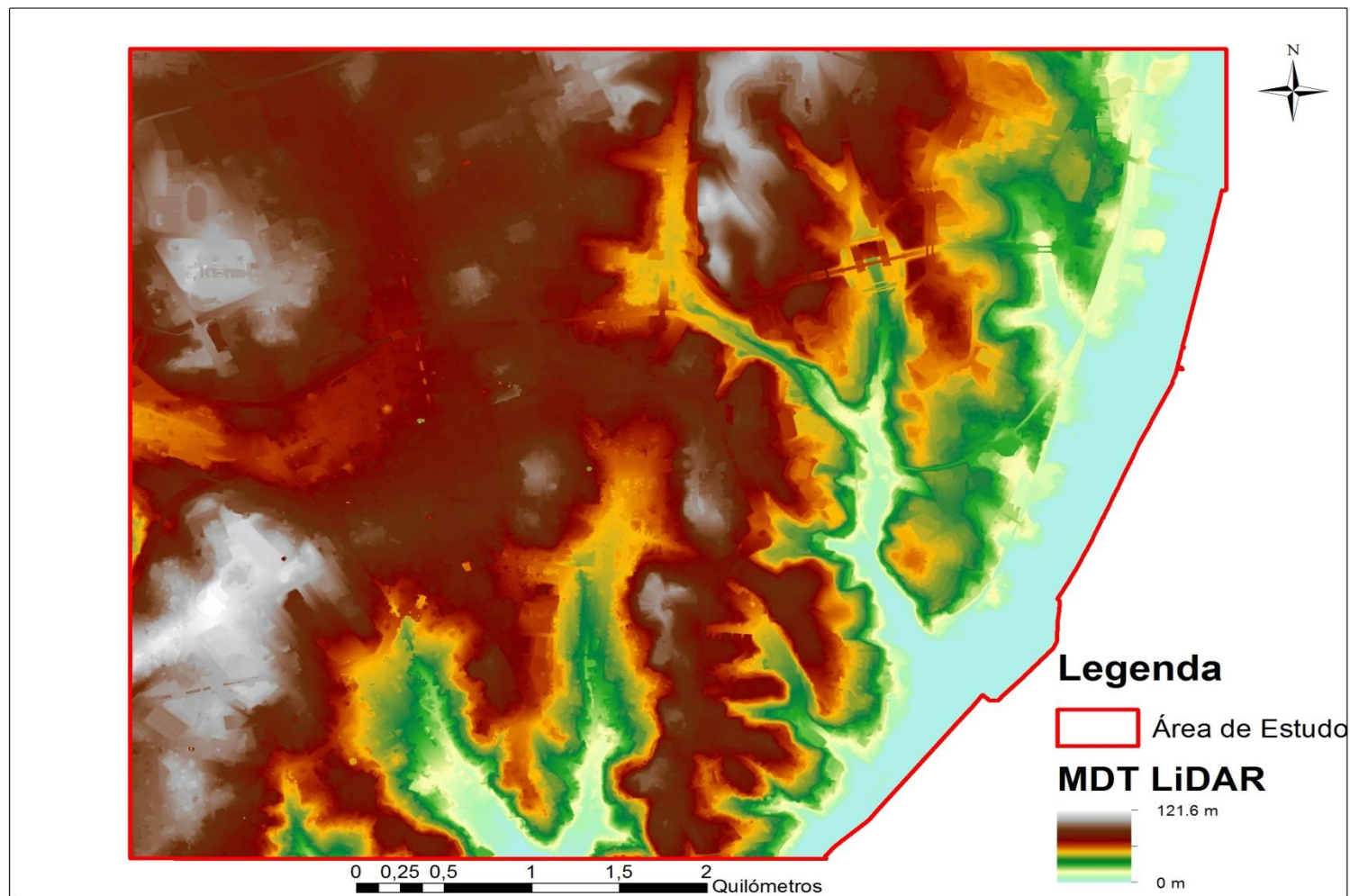


Figura 27 – MDT LiDAR final para a área de estudo.

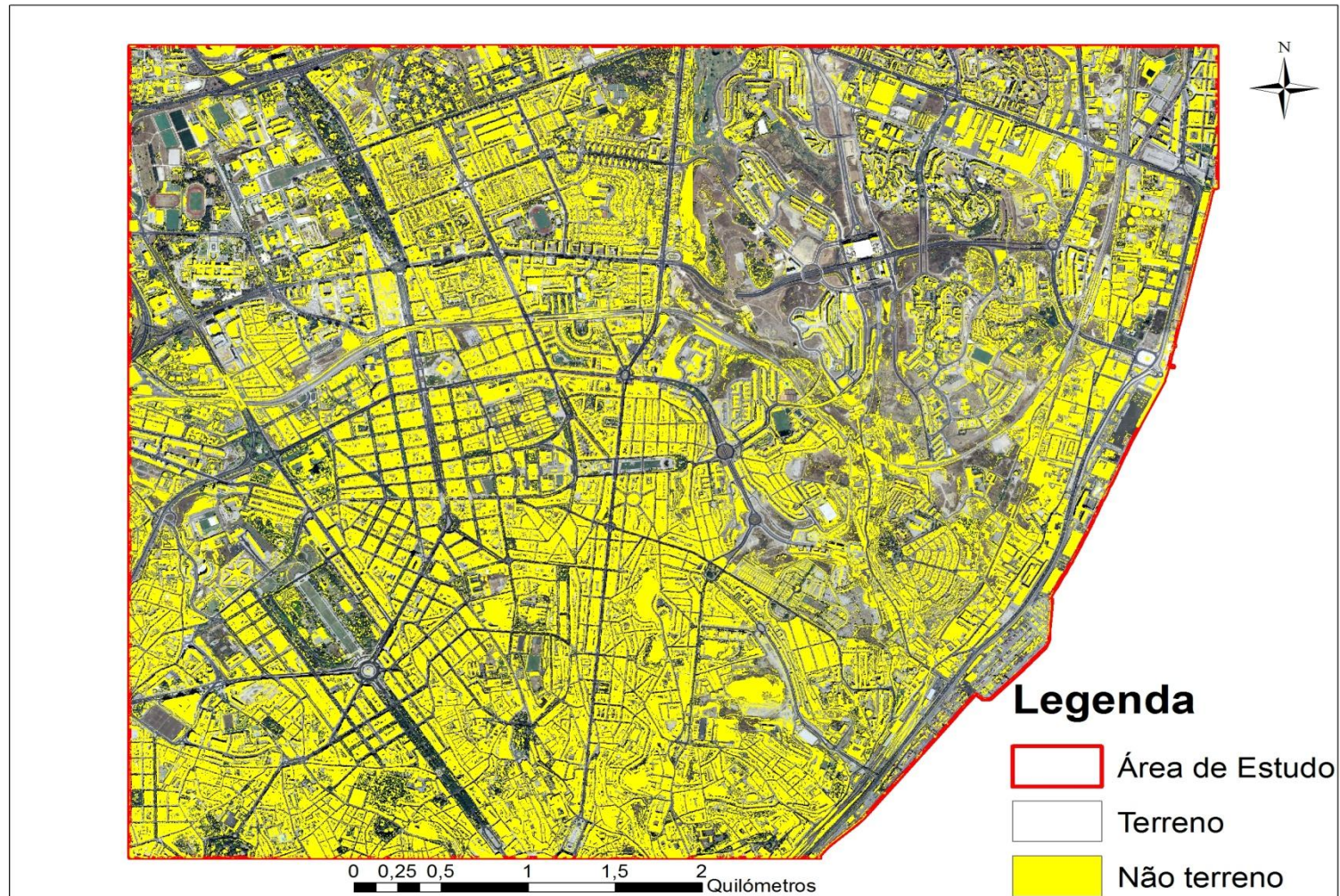


Figura 28 – Pixéis classificados com “não terreno” da área de estudo.

2.6.4 Avaliação da qualidade dos resultados

Para se avaliar a qualidade geral do MDT LiDAR, utilizaram-se duas técnicas sugeridas por Meng *et al.* [2010] na secção 2.4: a verificação visual (qualitativa) e a amostra aleatória de pontos de controlo (quantitativa).

Ao contrário do sugerido por Briese [2010] na secção 2.1.5, após se produzir o MDT LiDAR, não foi efectuada nenhuma edição manual para corrigir falhas provenientes da complexidade do terreno, nomeadamente em zonas urbanas.

2.6.4.1 Avaliação quantitativa

A recolha da amostra de pontos de controlo com precisão superior aos dados LiDAR, foi planeada de modo a representar toda a área de estudo e de forma a minimizar o tempo de levantamento e os custos associados. Para tal realizou-se um levantamento de 444 pontos de controlo e 1 Vértice Geodésico (VG) de 1ª ordem, com recurso ao método de posicionamento GPS denominado *Real-Time Kinematic* (RTK). Foram utilizadas as correcções GNSS da Rede Nacional de Estações Permanentes (RENEP) da Direcção Geral do Território (DGT), sendo cada ponto medido em modo contínuo com intervalo de 100 em 100m. O equipamento GNSS utilizado foi o Trimble R8 que foi acoplado ao tejadilho de um jipe. Foi definido no seu controlador um novo projecto com o sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89, conforme mencionado anteriormente. A exactidão obtida no VG de 1ª ordem, Poiais, está na Tabela 2.

Tabela 2 – Precisão obtida no VG Poiais.

	Ponto da Rede Geodésica Nacional		
	POIAIS		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Valores Referência	-86468.35	-101269.24	111.28
Valores Medidos	-86468,34	-101269,27	111.32
Diferenças	-0.01	0.03	0.05

As precisões obtidas nas coordenadas, estão dentro dos valores de referência divulgados pela DGT para este tipo de posicionamento que é de 5cm [DGT, 2013]. Durante o percurso efectuado não foram medidos mais pontos porque algumas zonas da cidade de Lisboa dificultam muito a recepção do sinal GNSS, nomeadamente zonas com edifícios altos, ruas muito estreitas e avenidas com vegetação de grande porte. A localização dos pontos de controlo medidos está representada na Figura 29.

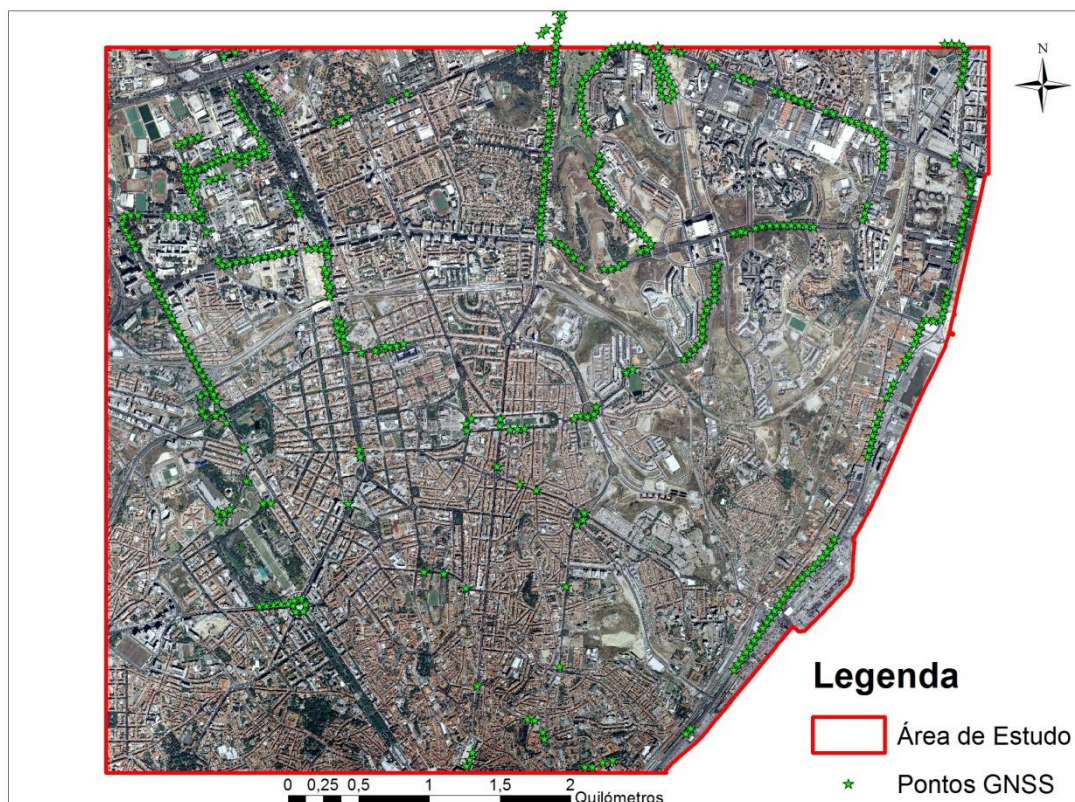


Figura 29 – Localização de pontos de controlo GNSS.

A Tabela 3 mostra os resultados estatísticos da avaliação da qualidade geral do MDT, obtido por este método.

Tabela 3 – Avaliação quantitativa da qualidade geral.

Pontos verificados	444
Resíduo mínimo (m)	-1.52
Resíduo máximo (m)	-4.36
Média (m)	-0.035
Desvio padrão (m)	0.35

Estes indicadores encontram-se acima do limite de tolerância do equipamento LiDAR utilizado neste projecto que, segundo o fabricante, é de 15 cm. O valor de 35 cm, reflecte a qualidade da nuvem de dados original, a qualidade da transformação dos dados originais numa estrutura raster, a qualidade do processo de classificação e a qualidade do processo de interpolação. O facto desta técnica de amostragem para efeitos de avaliação do MDT LiDAR, nunca ser suficientemente representativa do terreno para grandes áreas [Meng *et al*, 2010], faz com que os erros de classificação existentes na área de estudo tenham um efeito considerável no desvio padrão.

Diversos estudos sobre a qualidade final de MDT a partir de dados LiDAR, apresentam resultados na mesma ordem de grandeza. Ahokas *et al*. [2003], utilizando o

equipamento laser Toposys e TopEye, a partir de voos com 100 m e 800 m de altura de voo e densidade de pontos entre 1 e 8 por m², avaliaram a qualidade de um MDT produzido com um filtro de densificação progressiva. Usaram 3500 pontos de controlo e obtiveram valores de desvio padrão para a área de estudo que oscilaram entre os 4 cm e os 18 cm, consoante o tipo de solo. Segundo Pfeifer e Mandlbürger [2008], referências de outros estudos indicam desvios padrão até 40 cm em zonas de vegetação.

Pode-se concluir, que os resultados são adequados para se atingir o objectivo proposto para esta dissertação, que é identificar zonas de aterro por comparação com um MDT produzido a partir de fotografias aéreas de 1944 e que dificilmente apresenta esta qualidade.

2.6.4.2 Avaliação qualitativa

Para realizar esta avaliação, uma das opções é utilizar a Figura 28, onde se pode comparar as zonas classificadas como “não terreno” com os ortofotomapas da área de estudo e avaliar a sua qualidade geral.

Por se considerar que essa metodologia era insuficiente e muito dependente do operador, decidiu-se recorrer a outro produto para auxiliar na verificação visual (técnica utilizada por investigadores, conforme descrito na secção 2.4). O produto utilizado foi o MDT produzido pelo IGeoE e que, embora não possua a precisão característica dos produtos LiDAR, está isenta de erros de classificação, podendo servir como um excelente instrumento de verificação e identificação dos principais erros do algoritmo utilizado.

O MDT produzido no IGeoE, a partir daqui referido como MDT IGeoE, é elaborado com base em informação altimétrica restituída em modo de estereoscopia, como as curvas de nível, pontos cotados, linhas de água entre outros elementos.

Para auxiliar a avaliação qualitativa, calculou-se uma superfície de diferenças de acordo com a equação 21:

$$\text{Diferenças} = \text{MDT LiDAR} - \text{MDT IGeoE} \quad (21)$$

Como a precisão que a informação altimétrica oficial tem que cumprir, para a escala 1:25000, é 1/2 da equidistância natural das curvas de nível, isso equivale a um erro

máximo de 5m. Assim, esse foi o valor de tolerância usado para calcular as diferenças entre as duas superfícies.

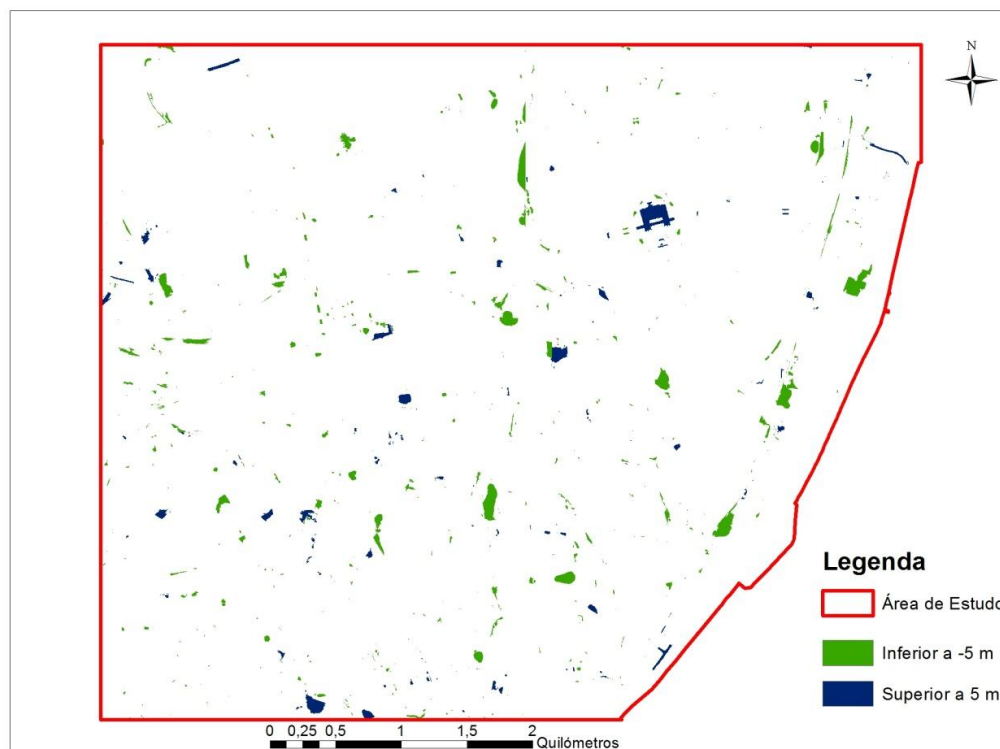


Figura 30 – Diferenças entre o MDT LiDAR e o MDT IGeoE.

Na Figura 30, a azul estão sinalizadas regiões do MDT LiDAR que se localizam acima do MDT IGeoE e a verde o inverso, para a tolerância definida. A maioria das zonas azuis corresponde a passagens superiores, Figura 31 – (b) e (c), ou edifícios que não foram eliminados do MDS, Figura 31 – (a). Por outro lado a verde são zonas de terreno que fruto do seu declive natural acentuado foram classificados como “não terreno”, Figura 31 – (c) e (d), ou tuneis/passagens desniveladas, Figura 31 – (a) e (b).

O maior erro identificado pelas diferenças entre os dois MDT é apresentado na Figura 32. Esse é um erro típico provocado pela complexidade dos edifícios, uma vez que é uma zona do terreno caracterizada por várias pontes e edifícios construídos à volta de uma depressão no terreno. Para além disso, entre as duas margens do terreno foi construído um edifício cuja altura coincide com a altura das suas margens. Este é um exemplo típico de onde a interpretação visual do local é necessária para uma correcta classificação dos objectos de uma nuvem de pontos LiDAR.



Figura 31 – Diferenças entre o MDT LiDAR e o MDT IGeoE: a) tuneis e edifício; b) Passagem superior e viaduto; c) Topo de elevação e passagem superior; d) Terreno com grande declive.



Figura 32 – Maior Diferença entre o MDT LiDAR e o MDT IGeoE: Estrutura não extraída.
Fonte: [GoogleMaps, 2013]

3 Modelo digital do terreno a partir de fotografia aérea

Os dados primários adquiridos para a produção de um MDT, assim como as técnicas de interpolação usadas são dois passos fundamentais que contribuem directamente para a qualidade do produto final. Na secção 3.1 discute-se a forma como foi realizada a aquisição dos dados por correspondência automática de imagens assim como os resultados obtidos. A técnica de interpolação utilizada posteriormente é descrita na secção 3.2.

A elaboração do MDT a partir de fotografia aérea, a partir de agora denominado por MDT Foto, baseia-se no sistema de coordenadas Hayford – Gauss / Datum Lisboa - Militar. Adoptou-se este sistema de coordenadas pelo facto de ser o mesmo com que foram determinadas as OE das fotografias, usadas como base de trabalho neste capítulo.

3.1 Aquisição amostra primária

A técnica de correspondência automática de imagens, conforme descrito em 1.1.6, pretende determinar pontos homólogos em pares estereoscópicos previamente orientados espacialmente. Os dados de base utilizados neste capítulo são as fotografias aéreas da área de estudo descritas em 1.4.1, cujos parâmetros de OE foram calculados por processos de ATA em trabalhos anteriores. Foram realizadas várias tentativas de aquisição de amostra primária com base nas orientações fornecidas. Fruto dos resultados não possuírem a qualidade desejada, a orientação espacial da cobertura fotográfica da área de estudo foi novamente calculada.

Na secção 3.1.1 e 3.1.2 são revistos os principais conceitos da técnica de correspondência automática de imagens e da orientação fotogramétrica. Na secção 3.1.3 são apresentadas as potencialidades do *software* utilizado. Por último, na secção 3.1.4 é descrita a metodologia seguida, as várias tentativas realizadas e os resultados obtidos.

3.1.1 O processo de correspondência automática de imagens

Para analisar os principais conceitos que estão por detrás do processo de correspondência automática de imagens por técnicas de processamento digital de imagem, é necessário recuar uma pouco até aos fundamentos que permitem visualizar pontos a três dimensões (3D) e às técnicas fotogramétricas utilizadas para os medir.

3.1.1.1 Estereoscopia natural

O conceito de estereoscopia é um dos mais importantes e pode-se definir como a capacidade natural que os seres humanos possuem para ver o mundo que os rodeia a três dimensões a partir das imagens captadas pelos seus dois olhos [Redweik, 2011]. Quando observamos um objecto fixo a uma certa distância com um olho de cada vez, fica-se com a sensação que este se está a mover de um lado para o outro à medida que se alterna o olho aberto. É precisamente a partir da diferença entre o ângulo com que cada olho observa o objecto que o nosso cérebro interpreta a distância até ele e proporciona uma visão tridimensional aos seres humanos. A essa diferença de posição relativa de um mesmo ponto nas duas imagens retinianas chama-se paralaxe, mais especificamente paralaxe horizontal por ter sempre uma posição paralela à base ocular [Redweik, 2011].

3.1.1.2 Estereoscopia artificial

A fotogrametria aproveitou, extensivamente, essa capacidade para realizar medições de objectos com precisão e desenvolveu vários métodos para criar estereoscopia artificialmente.

O conceito geral da estereoscopia artificial é disponibilizar ao cérebro duas imagens do mesmo objecto, obtidas de pontos de vista diferentes e que tem que estar orientados de modo a replicar as 3 condições naturais de estereoscopia [Redweik, 2011]:

- (1) Cada olho recebe apenas uma das imagens;
- (2) As imagens não podem ter paralaxe vertical (na direcção perpendicular ao plano de observação);
- (3) A paralaxe horizontal tem que estar dentro dos limites de 0 a 1,3 grados.

O objectivo principal da fotogrametria, para além da visualização de objectos a 3D, é precisamente medi-los com o intuito de produzir uma representação fidedigna do terreno. A medição é proporcionada por um ponto objecto, denominado marca flutuante, que não pertence a este e que está ligado a um dispositivo de medida. A marca flutuante é formada por duas meias marcas associadas a cada imagem do par estereoscópico. Nas estações fotogramétricas, estas meias marcas são materializadas por dois cursores, onde cada qual se move em relação a uma só imagem, referindo-se as suas coordenadas apenas a esse sistema de coordenadas. Se as duas imagens

estiverem orientadas de modo a serem observadas estereoscopicamente, os dois cursores movem-se paralelamente a y e podem-se afastar ou aproximar em relação a x. Quando o operador tiver a sensação que a marca está em contacto com o objecto, Figura 33, as coordenadas dos dois cursores podem ser registadas [Redweik, 2011].

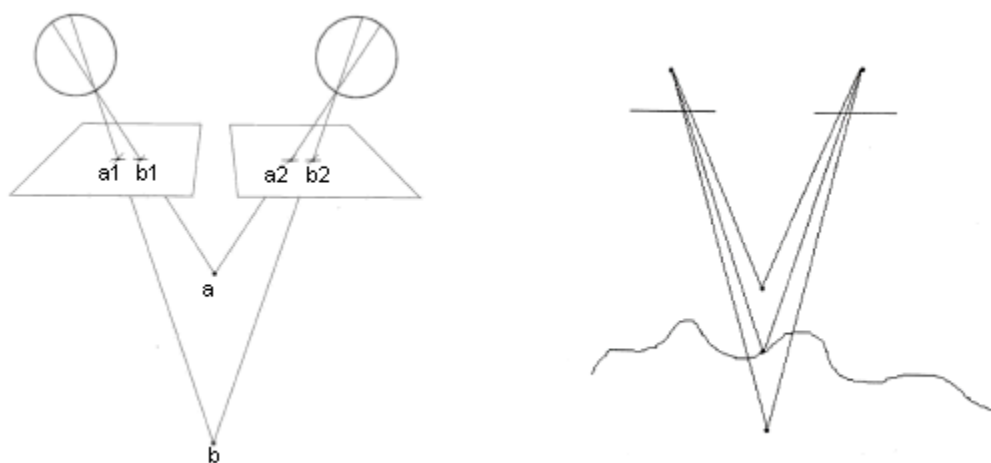


Figura 33 – Percepção a 3D.
Fonte: Adaptado de [Redweik, 2011]

Assim, pode-se determinar a paralaxe absoluta de um ponto pela diferença das suas paralaxes parciais obtidas do par estereoscópico:

$$P_a = x_{a1} - x'_{a2} \quad (22)$$

Onde:

- P_a é a paralaxe Absoluta no ponto a
- x_{a1} é a coordenada x do ponto i na fotografia da esquerda
- x'_{a2} é a coordenada x do ponto i na fotografia da direita

Para determinar a altura de um ponto no terreno, Figura 34, a partir da altitude de voo e da base aérea (distância entre pontos de captura de foto), aplica-se o princípio de semelhança entre triângulos, e obtém-se:

$$\frac{P_i}{f} = \frac{B}{H - h_l} \rightarrow h_l = H - \frac{B * f}{P_i} \quad (23)$$

Onde:

- h_l é a altitude do ponto l

- H é a altitude do voo
- B é a base aérea
- f é a distância focal
- P_i é a paralaxe do ponto i

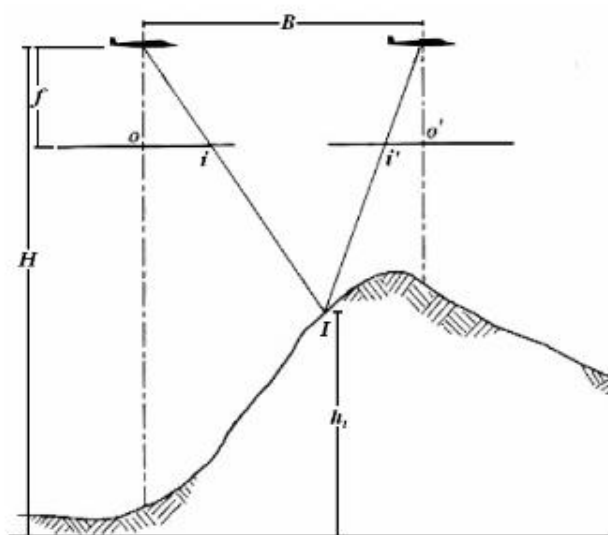


Figura 34 – Determinar a altura de um ponto no terreno.
Fonte: Adaptado de [Lillesand e Kiefer, 2000]

3.1.1.3 Identificação automática de pontos homólogos

A obtenção de informação altimétrica de pontos em fotografias aéreas por *software* de processamento automático depende do cálculo de diferença de paralaxe horizontal entre pixéis homólogos que formam o par estereoscópico. A localização dos pontos homólogos pode ser realizada manualmente pelo operador, quando ajusta a marca flutuante sobre um objecto, ou pode ser feita automaticamente com recurso a diversos operadores de processamento digital de imagens [Redweik, 2010].

De uma forma geral, os operadores utilizados na aquisição automática de pontos homólogos realizam operações matemáticas nos valores de cinzentos (ou radiométricos) dos pixéis da imagem. Caracterizam-se por actuarem em duas fases distintas, primeiro detectam pontos conspícuos numa imagem que sejam passíveis de ser identificados na outra imagem do par estereoscópico (*interest operator*). Depois, utilizando técnicas de correspondência de imagens, são averiguados quais são os pontos homólogos entre os pontos de interesse identificados anteriormente. Estas

técnicas podem ser classificadas como métodos de correspondência de imagens por áreas ou características [Karabork *et al.*, 2004].

Os *interest operators* privilegiam a pesquisa em zonas onde se verifique uma variação considerável de valores de cinzento, como pontos isolados da vizinhança, ou zonas que apresentem uma regularidade geométrica, como arestas. Estes operadores utilizam uma matriz de dimensões variadas, denominada por janela, para estudar as propriedades radiométricas e geométricas dessa parcela da imagem. Essa janela percorre todos os pixels da imagem, e, de acordo com os valores limite estabelecidos, identifica ou não o pixel em estudo como ponto de interesse. Dos *interest operators* mais utilizados com base na sua rapidez, percentagem de identificação de pontos e localização, destaca-se o operador *Förstner*, o *SUSAN* e o *FAST* [Jazayeri e Fraser, 2008].

Os métodos de correspondência de imagens por áreas usam o coeficiente de correlação normalizado ou MMQ para analisar a correspondência entre imagens. O objecto de estudo desses métodos é o nível de cinzento dos pixels vizinhos de uma janela, sendo que a técnica mais usada é a correlação cruzada [Karabork *et al.*, 2004]. Este método compara a vizinhança de um ponto conspícuo de uma imagem, denominada por matriz padrão (M_p) ou de referência, com uma zona na segunda imagem, denominada por matriz de busca (M_b), e de dimensões superiores à primeira. A matriz de padrão vai sendo sucessivamente comparada com sub-matrizes de M_b de dimensões iguais, percorrendo todos os pixels de M_b , Figura 35.

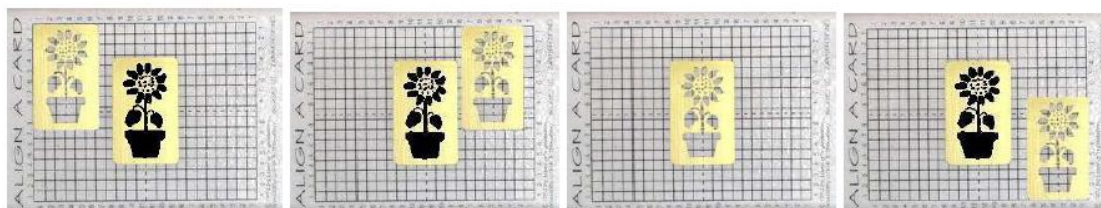


Figura 35 – Correspondência por áreas.
Fonte: [Redweik, 2010]

Em cada posição possível de M_p em M_b são calculados os coeficientes de correlação normalizados (ρ), pela equação 23: [Heipke, 1996]:

$$\rho = \frac{\sigma_{RP}}{\sigma_R \sigma_P} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_R(x_i, y_j) - \overline{g_R})(g_P(x_i, y_j) - \overline{g_P}))}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (g_R(x_i, y_j) - \overline{g_R})^2 * \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (g_P(x_i, y_j) - \overline{g_P})^2}} \quad (23)$$

Onde:

- σ_{RP} é a covariância entre as janelas de referência e pesquisa;
- σ_R é o desvio padrão da janela de referência;
- σ_P é o desvio padrão da janela de pesquisa;
- n e m são os números de colunas e linhas da janela de referência;
- $g_R(x_i, y_j)$ é o nível de cinza da posição (x_i, y_j) na janela de referência;
- $g_P(x_i, y_j)$ é o nível de cinza da posição (x_i, y_j) na janela de pesquisa;
- $\overline{g_R}$ é a média dos níveis de cinza da janela de referência;
- $\overline{g_P}$ é a média dos níveis de cinza da janela de pesquisa.

Os valores desta função oscilam entre [-1,1]. O valor 1 corresponde à posição de máxima correspondência radiométrica entre a matriz de busca e matriz padrão, onde existe uma elevada possibilidade de ser a zona homóloga da segunda imagem, e por consequência, corresponder ao ponto homólogo da primeira. O valor -1 corresponde aos casos de correlação inversa e o valor 0 indica que não há correlação entre as matrizes M_p e M_b .

O MMQ, tem como objectivo refinar a correspondência entre imagens minimizando os resíduos das diferenças entre a M_p e a M_b . Enquanto que o método da correlação cruzada utiliza as diferenças radiométricas entre imagens e atinge a precisão máxima de um pixel, o MMQ, por outro lado, utiliza parâmetros geométricos e atinge valores ao nível do sub-pixel [Karabork *et al.*, 2004].

Os operadores de correspondência de imagens por características pretendem colmatar o funcionamento dos anteriores, e aplicam-se principalmente em zonas onde os métodos de correspondência por áreas não atingem bons resultados. Exemplos onde o método anterior revela dificuldades são as áreas com elevada amplitude de cotas. Nessas zonas, devido às características da perspectiva central, algumas zonas homólogas ficam bastante alteradas, o que impossibilita bons resultados com o coeficiente de correlação normalizado. Um dos métodos de correspondência por

características frequentemente aplicado em estações digitais é a pirâmide de duas imagens [Redweik, 2010].

A pirâmide de imagens é um conjunto de imagens com vários níveis onde a resolução da imagem vai diminuindo sucessivamente, através de operações de reamostragem sucessivas a partir da original, Figura 36. Os pontos conspícuos são identificados no nível de menor resolução, e consequentemente menos pormenores, e é realizada a correspondência. Os pontos que passaram na correspondência anterior são transferidos para o nível inferior e é analisada novamente a correspondência neste ambiente de mais informação. Neste nível são simultaneamente procurados novos pontos de interesse. O processo repete-se até ao nível de maior pormenor, obtendo-se no final o conjunto de pontos homólogos.



Figura 36 – Pirâmide de imagens.
Fonte: [Redweik, 2010]

3.1.2 Orientação fotogramétrica

A palavra fotogrametria deriva de três palavras gregas: “Photon” (luz), “Graphos” (descrição) e “Metron” (medições). Ou seja, significa a arte ou ciência que executa medições através de fotografias. Para realizar essas medições, é fundamental que se restabeleça previamente a relação espacial única que existia entre a imagem e o objecto, no momento em que foi captado. O procedimento que pretende recuperar essa geometria, tão essencial a esta ciência, denomina-se por orientação fotogramétrica.

Na secção seguinte são abordadas as orientações necessárias a este processo e a forma como são determinadas. Na secção 3.1.2.2, é descrita com mais pormenor a técnica analítica usada para determinar os parâmetros de OE que foi usada nesta dissertação. Por último são revistos os indicadores numéricos de qualidade adequados para se avaliar os resultados de uma aerotriangulação.

3.1.2.1 Tipos de orientações fotogramétricas

Actualmente, as técnicas usadas para recuperar as orientações e determinar as coordenadas terreno de objectos apenas envolvem as orientações internas (OI) e OE de cada foto, ficando cada foto associada a um conjunto de parâmetros. A OI é uma operação de reconstrução da posição do plano imagem dentro da câmara no momento em que foi tirada a fotografia. A OE refere-se à posição da câmara e à orientação do seu eixo fotográfico no espaço objecto também no mesmo momento.

A orientação relativa (OR), embora já não seja um passo obrigatório na recuperação das orientações da fotografia, permite reconstituir a posição entre si de duas ou mais fotografias do mesmo objecto e assim, gerar o modelo estereoscópico passível de ser observado e medido.

As principais características da OI são:

- (1) É constituída por 3 parâmetros: constante da câmara – c e coordenadas foto do ponto principal – x_o e y_o .
- (2) Nas câmaras analógicas o sistema de coordenadas é definido pelas marcas fiduciais que se encontram no plano imagem, sendo a origem do sistema de coordenadas foto a intersecção das marcas fiduciais diametralmente opostas, denominado por ponto médio.
- (3) Numa câmara ideal de uma só objectiva, o ponto principal, que é a intersecção do eixo optico da objectiva com o plano imagem, coincidiria com o ponto médio. Normalmente isso não acontece e origina coordenadas foto do ponto principal diferentes de zero. Normalmente os parâmetros de OI são determinados em laboratório e são registados no certificado de calibração
- (4) Como os modelos matemáticos fotogramétricos relacionam coordenadas foto com coordenadas terreno, é necessário transformar as coordenadas pixel medidas no computador em coordenadas foto. Existem duas situações típicas neste tipo de operações: quando as imagens digitais são obtidas por câmaras digitais ou quando são imagens digitalizadas correspondentes a fotografias analógicas. Nesta dissertação utilizou-se a segunda modalidade pelo que se irá rever, apenas para essa, quais os fundamentos científicos:
 - a. Utiliza-se uma transformação geométrica plana entre os dois sistemas de coordenadas.

- b. As coordenadas foto das marcas fiduciais constam do certificado de calibração e são medidas as suas coordenadas pixel na imagem digitalizada.
- c. As marcas fiduciais vão servir de pontos conhecidos nos dois sistemas de coordenadas.
- d. Para imagens com 4 marcas fiduciais, calcula-se os parâmetros de uma transformação afim de 6 parâmetros.

$$\text{Transformação afim (6 parâmetros)} \begin{cases} x = a_{01} + a_{11}xp + a_{21}yp \\ y = a_{02} + a_{12}xp + a_{22}yp \end{cases} \quad (24)$$

Onde:

- x, y : representam coordenadas foto de um ponto
- xp, yp : representam coordenadas pixel de um ponto
- e. Cada marca fiducial dá origem a duas equações, pelo que 3 marcas é o número mínimo para se determinar os parâmetros a_{ij} da Equação 24 e que permitem determinar automaticamente as coordenadas foto de qualquer ponto medido na imagem digitalizada.

As principais características da OE são:

(5) É constituída por 6 parâmetros independentes:

- a. As coordenadas objecto do centro de projecção (X_o, Y_o, Z_o)
- b. Três ângulos independentes que definem univocamente a orientação do eixo fotográfico:
 - i. Ângulo de rotação em torno do eixo dos XX: ω .
 - ii. Ângulo de rotação em torno do eixo dos YY: ϕ .
 - iii. Ângulo de rotação em torno do eixo dos ZZ: κ .

(6) A determinação desses parâmetros pode ser feita de modo directo e indirecto.

O mais comum é o indirecto e consiste na determinação analítica através do mínimo de 3 pontos não colineares de coordenadas conhecidas. O modo directo refere-se à determinação desses parâmetros durante a fase de aquisição da fotografia com recurso a um sistema GNSS/IMU.

A técnica indirecta de determinação dos parâmetros de orientação externa mais usada é o cálculo analítico através da aerotriangulação. Na próxima secção ir-se-à aprofundar essa temática.

As principais características da OR são:

- (7) Define-se pelo sistema de coordenadas modelo, pelo vector que une os dois centros de projecção (base do modelo) e pelas rotações espaciais relativas entre as duas fotos.
- (8) Pelo facto de existir para cada ponto objecto um plano epipolar, definido pelos raios luminosos que formam as imagens desse ponto nas duas fotos e a sua base, são apenas necessários cinco parâmetros independentes para definir a OR. Pode-se escolher uma das seguintes configurações de parâmetros:
 - a. Base e uma rotação de uma foto fixa. Parâmetros a determinar: κ_1 , ϕ_1 , ω_2 , κ_2 , ϕ_2 .
 - b. Posição espacial de uma foto fixa e componente x da base. Parâmetros a determinar: ω_2 , κ_2 , ϕ_2 e b_z
- (9) Os parâmetros são calculados com base nas equações de colinearidade (descritas em 3.1.2.2), aplicadas às coordenadas dos pontos homólogos (medidos manual ou automaticamente nas zonas de von Gruber) e às coordenadas dos pontos modelo, estimados pelo MMQ.
- (10) Depois de estimar por MMQ os parâmetros de OR de um par estereoscópico, é possível determinar quais são os pares de pontos homólogos que não se intersectem no espaço modelo devido a paralaxe vertical, provocada por medições imprecisas das suas localizações em cada fotografia. A determinação da OR é utilizada em *softwares* para corrigir medições efectuadas sobre fotografias, antes de ser aplicada a aerotriangulação. [PHOTOMOD, 2011]

3.1.2.2 Aerotriangulação

Define-se aerotriangulação como o conjunto de operações matemáticas e estatísticas que permite orientar a cobertura fotográfica de um objecto (zona do terreno) de modo a formar um modelo completo semelhante ao objecto, usando o mínimo de apoio geodésico possível, como pontos fotogramétricos (PF). Esta técnica, permite que a partir das coordenadas objecto de alguns pontos que aparecem fotografados e considerando a geometria individual da fotografia e do modelo, seja possível determinar os parâmetros que relacionam analiticamente as imagens com o objecto. Após conhecidos esses parâmetros, conhecidos por parâmetros de orientações externas, é possível determinar com grande precisão coordenadas terreno de pontos, com base em medições na fotografia.

A aerotriangulação automática (ATA), visa automatizar e acelerar a aquisição dos dados primários à aerotriangulação que é uma das fases mais morosas do processo. Os dados necessários para o cálculo do ajustamento medidos automaticamente com esta técnica, são as coordenadas dos pontos de passagem e os pontos de ligação. A medição desses dados, dependendo do *software*, é realizada em zonas prioritárias da foto recorrendo a técnicas já referidas em 3.1.1.3. As coordenadas pixel dos pontos homólogos são posteriormente analiticamente transformadas em coordenadas foto, através dos parâmetros de OI, em todas as imagens onde aparecem, de acordo com a fórmula expressa no ponto (4) e da secção 3.1.2.1.

O processo de determinação da orientação externa de fotografias através de aerotriangulação pode ser realizada de duas formas: em faixa ou em bloco.

A aerotriangulação em bloco por feixes perspectivos, utilizada neste trabalho, é conhecida em diversos *softwares* comerciais como “*Bundle Adjustment*”. É um método flexível e preciso e caracteriza-se de forma genérica pelo seguinte:

- (1) Parte-se da informação da foto para se obter dados do objecto, não havendo necessidade de operações intermédias, como a formação de modelos estereoscópicos com a respectiva OR.
- (2) Nesta triangulação são usados os vários raios perspectivos, Figura 37. Estes raios com origem num objecto terreno, passam pelos vários centros de projecção e intersectam todos os planos imagem nas fotos onde este é observado.

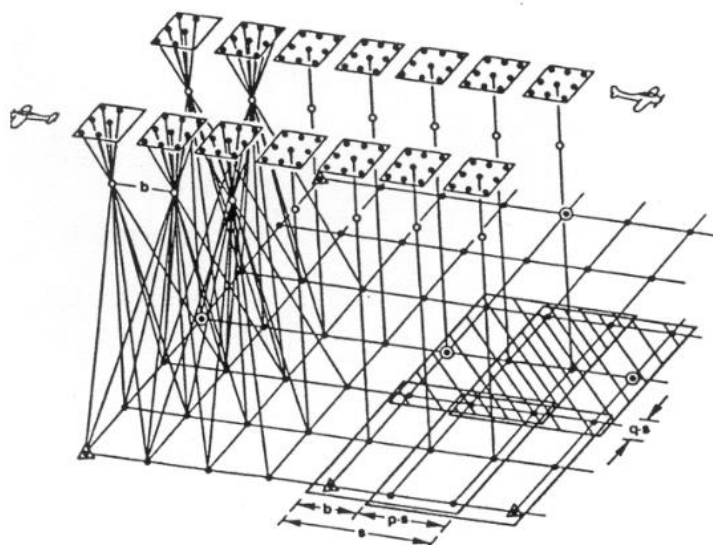


Figura 37 – Feixes perspectivos.
Fonte: [Redweik, 2010]

- (3) É necessário medir coordenadas foto de todos os pontos de apoio e PF's, em todas as fotos onde aparecem.
- (4) É necessário conhecer coordenadas objecto de todos os PF's do bloco, assim como os parâmetros de OI das câmaras que fotografaram o bloco.
- (5) O modelo matemático utilizado neste algoritmo de aerotriangulação é o da projecção central. O facto de durante o momento da exposição fotográfica um ponto no espaço objecto P, o seu ponto imagem respectivo P' e o centro de projecção se encontrarem obrigatoriamente sobre a mesma recta, permite estabelecer uma relação geométrica que relacione as coordenadas objecto do ponto P (X,Y,Z) e as suas foto coordenadas P' (x,y,z), denominada por equações de colinearidade. Essas equações incluem parâmetros de OI e OE das imagens, ou seja a definição do feixe, o posicionamento do centro de projecção e a orientação do feixe no espaço objecto no momento de captura da fotografia.

As equações de colinearidade são definidas pelas seguintes expressões:

$$x = x_0 - f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (25)$$

$$y = y_0 - f \cdot \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (26)$$

Onde:

- x, y são as coordenadas do ponto de interesse no espaço imagem
- x₀, y₀ são as coordenadas do centro de perspectiva no espaço imagem
- f é a constante da câmara
- X, Y são as coordenadas do ponto de interesse no espaço objecto
- X₀, Y₀ são as coordenadas do centro de perspectiva no espaço objecto
- r_{ij} (Matriz de rotação do sistema coordenadas foto

$$\text{em relação ao sistema de coordenadas objecto}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \phi \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa + \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ \sin \phi \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix}$$

- (6) São necessários valores iniciais para todas as incógnitas (parâmetros OE de todas as fotos do bloco e coordenadas objecto de todos os pontos medidos).

- (7) Desta forma, utilizando-se um mínimo de 3 pontos de coordenadas conhecidas, é possível definir 3 pares de equações e calcular os 6 parâmetros de OE para cada foto ($X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa$).
- (8) Os valores são obtidos iterativamente pelo MMQ, de modo a que os resíduos entre pontos homólogos das várias fotografias e dos PF's sejam mínimos.

3.1.2.3 Análise de resultados da aerotriangulação

A aerotriangulação consiste num ajustamento iterativo cujos resultados tem que ser analisados de forma a avaliar se o modelo matemático se ajusta às observações. Caso isso não se verifique, é necessário efectuar correcções, como eliminar observações erradas ou alterar o sistema de pesos, até se obter resultados aceitáveis, nomeadamente OE e coordenadas terreno fiáveis [Redweik, 2010].

Existem vários indicadores numéricos de qualidade que podem ser utilizados para avaliar a qualidade final do ajustamento de uma aerotriangulação. De seguida irão ser descritos apenas os que foram utilizados neste trabalho:

- Resíduos: É a diferença entre o valor observado original e o valor determinado. Os resíduos são a base de muitos indicadores de qualidade, como o sigma naught e o RMS.
- Sigma naught (σ_0): Indica a qualidade geral do ajustamento, nomeadamente a precisão da medição das coordenadas foto, sendo um dos mais importantes:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i p_i v_i}{r}} \quad (27)$$

Onde:

- v_i é resíduo da observação i
- p_i é o peso da observação i
- r é a redundância total
- n é o número de observações

Para se obter um pequeno valor de σ_0 , é necessário eliminar os erros grosseiros e sistemáticos dos resultados. Em ajustamentos combinados onde entram vários tipos

de observações com as respectivas atribuições de pesos, usa-se o cálculo de um indicador de variância global, que dá a razão entre a variância calculada e a variância das observações estabelecidas a priori. O valor esperado é 1.

Se o σ_0 for maior que o esperado, há que tentar identificar o problema. No ajustamento por feixes perspectivos os valores de σ_0 são, segundo Redweik [2010], influenciados por:

- (1) qualidade das imagens;
- (2) scanner utilizado (tamanho pixel, calibração);
- (3) tipo de terreno configurado para o algoritmo de correlação na ATA;
- (4) distribuição dos pontos ligação entre modelos e fiadas;
- (5) qualidade câmara.

- Erro Médio Quadrático (RMS): É utilizado como um indicador numérico de qualidade da aerotriangulação quando se tem para determinadas observações, valores calculados pelos parâmetros estimados e valores obtidos por leitura directa, como por exemplo pontos de controlo.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n}} \quad (28)$$

Onde:

- v_i – resíduo da observação i
- n – número de observações

3.1.3 Software PHOTOMOD

O *software* PHOTOMOD® versão *Lite*, foi o utilizado na aquisição da amostra primária por correspondência automática de imagens e no processo de recuperação das orientações das fotografias aéreas que foram objecto de estudo neste trabalho.

Esta versão é uma aplicação gratuita desenvolvida pela empresa Racurs Co., desde 1994, sendo aplicada em diversas áreas associadas à cartografia digital como a fotogramétrica, cadastro, cartografia, detecção remota, entre outras [PHOTOMOD, 2011].

As principais operações possíveis de realizar com este *software* são:

- Determinação de OI e OR de fotografias;
- Aerotriangulação do bloco de imagens usando vários métodos;
- Medição automática de pontos de ligação;
- Produção automática de MDE;
- Produção de ortofotomapas;
- Estereorrestituição.

As principais limitações identificadas na versão *Lite* são o número limite de 20 fotografias por bloco de imagens e o facto de cada *layer* de informação só poder conter um máximo de 50000 pontos, Figura 38.

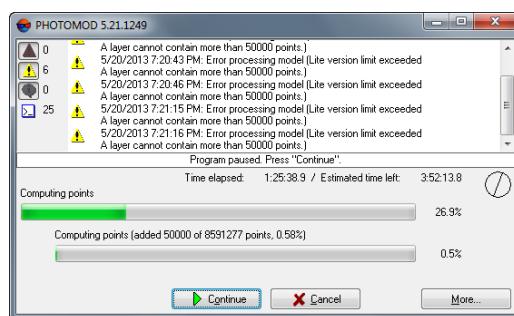


Figura 38 – Limite de pontos da versão *lite* do Photomod®.

De forma a utilizar as ferramentas disponibilizadas pelo *software* que permitem gerar uma nuvem de pontos cotadas da área de estudo, é necessário previamente orientar espacialmente as fotografias fornecidas.

Criou-se então um novo projecto no PHOTOMOD®, onde se definiu o sistema de coordenadas para os resultados (sistema Hayford-Gauss/ Datum Lisboa - Militares). Posteriormente, importou-se as fotografias relativas à área de estudo formando-se um bloco, sendo cada fotografia colocada na sua posição relativa dentro do mesmo.

Por último definiu-se a orientação interna das imagens e introduziu-se os dados de orientação externas de cada fotografia. Uma vez que não existia um certificado de calibração da câmara, a recuperação da OI é sempre incompleta, conforme descrito em 3.1.2.1, não sendo possível saber com precisão quais as coordenadas do ponto principal da imagem. Assim, foi criada inicialmente uma câmara como sendo digital com as seguintes configurações, Figura 39.

Camera type
☒ Digital ☐ Film
 Show digital camera parameters in
☒ mm ☐ pix
 Focal length, mm: 204.4000
 Calibration date: 8/19/2013
 Principal point, mm: X: 0.0000 Y: 0.0000
 Description:
 Point of origin
☒ In image center ☐ In lower left corner
 Pixel size, micron
 X: 21.000 Y: 21.000
 Sensor size, pix (optional)
 X: 0 Y: 0

Figura 39 – Parâmetros de configuração da câmara.

Introduzida esta informação inicial, o PHOTOMOD® orienta espacialmente o bloco de fotografias no momento em que foram captadas com recurso às orientações externas fornecidas, na opção “*Block Layout*” e “*By exterior orientation*”, Figura 40.

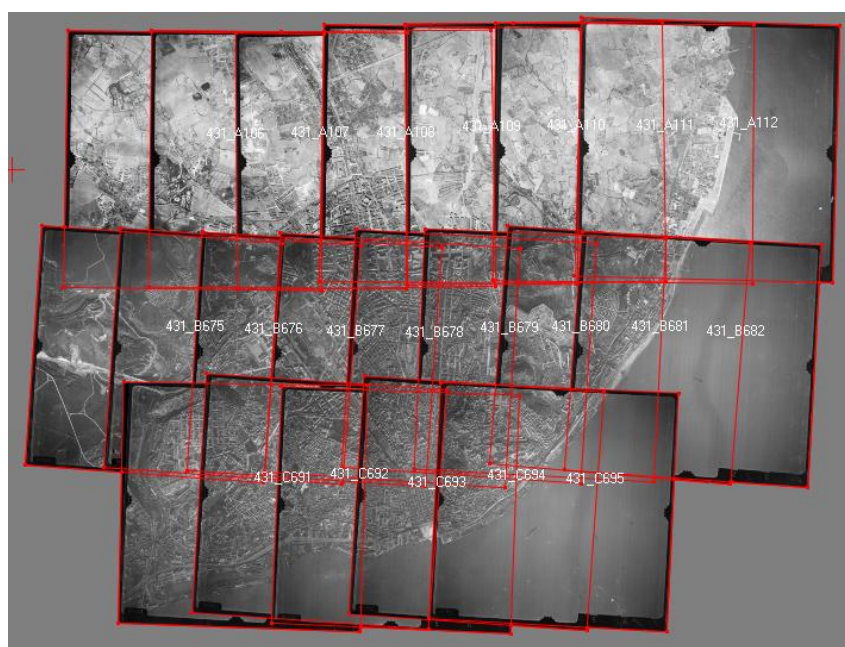


Figura 40 – *Block Layout*.

3.1.4 Execução e resultados

Após ter o bloco de fotografias orientado espacialmente em relação ao objecto fotografado, usou-se a função “*compute points automatic*” para detectar pontos 3D nas imediações de zonas pré-definidas pelo operador, utilizando o algoritmo “correlator” [PHOTOMOD, 2011]. Esse algoritmo utiliza o método de correspondência por áreas e por características, definido anteriormente na secção 3.1.1.3, e pode-se resumir da seguinte forma:

- O algoritmo, numa primeira fase, constrói uma grelha regularmente espaçada de pontos dentro do par estereoscópico orientado e identifica pontos conspícuos nas proximidades de cada nodo da imagem da esquerda.

- Depois, analisa o coeficiente de correlação normalizado, existente entre a matriz de vizinhança do ponto conspícuo identificado e uma matriz de busca (à volta do nodo) cuja área é definida pela amplitude de cotas dentro do par estereoscópico.
- Por fim, calcula a coordenada z no ponto de melhor correlação. No caso de todos os parâmetros calculados estarem dentro dos limites definidos pelo operador, esse ponto é registado, caso contrário é ignorado passando o algoritmo à análise do próximo nodo da grelha.
- O algoritmo utilizado pelo *software*, é extremamente flexível e adaptável ao terreno permitindo realizar a medição de pontos nas mesmas zonas repetidamente com configurações diferentes em cada passagem. Uma das potencialidades desta opção é poder aplicar a técnica de correspondência por características, recorrendo a pirâmides de imagem com menor resolução, de forma a complementar a medição de pontos realizada no método anterior.

Esta função possui várias opções que podem ser configuráveis. As mais importantes, são as seguintes:

- ❖ *Search area* – Define a área de trabalho. Tem como opções: “*All images*”, “*Select images*” e “*Active stereopair*”. Por defeito, utilizou-se sempre a segunda. [PHOTOMOD, 2011].
- ❖ *Grid* – Para se visualizar e editar os parâmetros da grelha de pontos inicial, como: “*Area*” e “*Aproximate nodes number*”. Por defeito configurou-se uma grelha espaçada de metro a metro. [PHOTOMOD, 2011].
- ❖ *Initial approximation* – Para se definir o valor da coordenada ‘z’ inicial, utilizada como primeira aproximação para procurar o ponto nas imagens da esquerda e da direita do par estereoscópico. As opções disponíveis são: “*mean stereopair elevation*” – calculado a partir dos parâmetros de OE; “*Fixed elevation*” – utilizador define o valor de z e “*DEM*” – usa-se um MDE. Por defeito usou-se a primeira opção. [PHOTOMOD, 2011].
- ❖ *Correlator preset* – Os parâmetros do “correlator” usados para gerar pontos automaticamente são adaptados a cada tipo de terreno. Existem, por pré-definição, quatro opções disponíveis: “*mountainous área*”, “*desert*”, “*urban area*” e “*rural area*”. Todas estas opções podem também ser personalizadas. Esta opção foi configurada consoante a interpretação visual do par estereoscópico. A Figura 41 mostra para cada cenário em causa, alguns dos parâmetros passíveis de ser configurados [PHOTOMOD, 2011]:

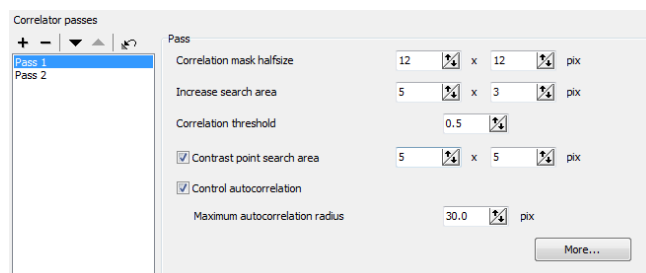


Figura 41 – Parâmetros do correlator.

- *Correlation mask halfsize* – Permite configurar a área da matriz de correlação à volta do ponto conspícuo identificado, em X e em Y. A área da matriz de correlação será igual a $(2*X+1)*(2*Y+1)$.
- *Increase search área* – Permite corrigir situações onde a área de busca estimada para o ponto respectivo na imagem da direita, derivada da orientação do par estereoscópico é demasiado pequena. A área de busca é determinada para a amplitude de cotas máxima existente dentro do par. Se essa amplitude for reduzida, também a área de busca o será. Acontece quando os pontos de passagem e ligação existentes no par não reflectem a amplitude de cotas do terreno.
- *Correlation treshold* – É o valor mínimo do coeficiente de correlação normalizado, para que o ponto da imagem da esquerda seja considerado homólogo de outro na imagem da direita de um par. Depende da qualidade fotográfica do bloco em estudo e do tipo de terreno. Por defeito os valores oscilam entre 0.5-0.7 (Deserto); 0.5-0.7 (Montanha); 0.5-0.75 (área rural) e 0.7-0.75 (área urbana).
- *Contrast point search area* – Esta configuração é opcional e serve para limitar a área de busca do ponto de maior contraste ou conspícuo na imagem da esquerda. Define o tamanho da área em pixéis, à volta da aproximação inicial fornecida pelo nodo da grelha, onde esse ponto é procurado, antes de a correlação ser realizada. É recomendado aumentar o valor em imagens com contornos claros e reduzir o valor em áreas de baixo contraste onde a probabilidade de erro de correlação é elevada.
- *Control autocorrelation e maximum autocorrelation radius* – Esta configuração é opcional e serve como um filtro complementar ao coeficiente de correlação normalizada. Este filtro apenas se aplica aos pontos das imagens da direita e serve para analisar a sua autocorrelação, ou seja, o seu “nível de diferença” para a sua vizinhança. Se esse ponto for muito semelhante aos vizinhos, é

provável que, mesmo com coeficientes de correlação elevados, se esteja a identificar como homólogo um ponto errado para a imagem da esquerda. Esta opção utiliza o raio de autocorrelação para filtrar os pontos, ou seja, se o utilizador escolher um raio de autocorrelação menor que o calculado pela função, o ponto é rejeitado. Este parâmetro é calculado da seguinte forma:

- Sendo a função de correlação da máscara com as regiões da própria imagem, definida pela função gaussiana:

$$f(r) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (29)$$

onde:

- r é o deslocamento da máscara em pixéis
- $f(r)$ descreve o coeficiente de correlação da máscara
- A função tem o valor 1, quando o deslocamento da máscara em relação à imagem é zero. σ representa o raio da área a partir do qual o coeficiente de correlação é inferior a 0.5.
- O valor do raio de autocorrelação calculado pela função, é determinado para a posição $r=0$. Isto significa que quanto mais pequeno for o raio de autocorrelação σ , maior é a diferença desse ponto para a sua vizinhança, mais pontiagudos são os piques de autocorrelação da função gaussiana no valor zero (nenhum deslocamento da máscara) e menor será a probabilidade de um ponto da direita com máximo coeficiente de correlação, corresponder à máscara deslocada.
- O fabricante do *software*, aconselha usar em imagens com qualidade e em áreas urbanas, o valor de referência 8-9 pixéis. Nas restantes usar um valor próximo de 30 pixéis.
- *Overview level* – Permite realizar a correlação entre várias imagens sucessivamente reamostradas com menor resolução a partir da original. Valor 0: zoom 1:1; valor 1: reamostrada duas vezes; valor 2: reamostrada quatro vezes e assim sucessivamente.

3.1.4.1 Primeira abordagem

Na primeira tentativa, calculou-se o MDS a partir das fotografias aéreas orientadas com os parâmetros OE fornecidos, utilizando-se as configurações por defeito da

função “*compute points automatic*”. A principal configuração realizada na função anterior foi a escolha do tipo de terreno onde o algoritmo “correlator” foi aplicado, consoante interpretação visual realizada nas fotografias. A escolha oscilou entre “rural” e “urbano” e a Tabela 4 resume as principais configurações usadas para cada tipo.

Tabela 4 – Principais configurações utilizadas no algoritmo “*compute points automatic*”.

Tipo de Terreno	Passagens algoritmo	Overviews	Correlation mask halfsize (pixeis)	Increase search area (pixeis)	Correlation threshold	Contrast point search area (pixeis)	Control Autocorrelation (pixeis)
Rural	1	0	12 x 12	5 x 3	0.5	5 x 5	30
	2	1	12 x 12	3 x 1	0.75	5 x 5	30
Urbano	1	1	10 x 10	10 x 2	0.75	-	30
	2	0	10 x 10	10 x 2	0.7	5 x 5	30

Os resultados obtidos são pouco coerentes. Para além de se registarem oscilações muito grandes entre as cotas de pontos próximos, conforme se pode verificar na Figura 42, estes valores são errados uma vez que o Terreiro do Paço em 1944 não teria cotas entre os 28 e os 199 metros. Outro indicador demonstrativo da incorrecta orientação espacial da cobertura fotográfica é a dificuldade em observar pares de fotografias em estereoscopia.

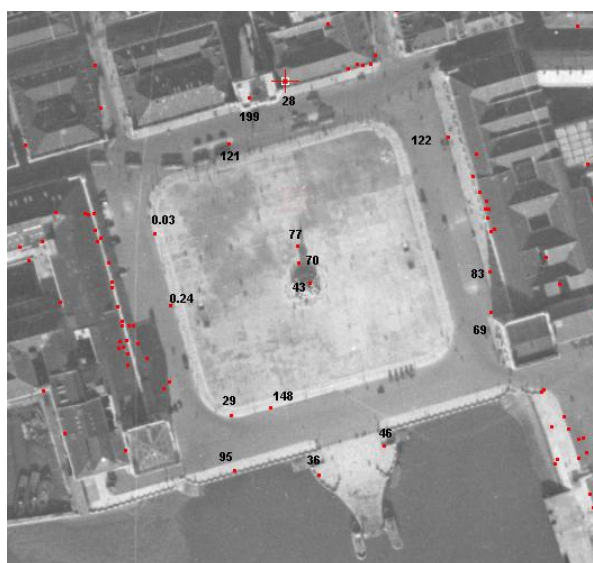


Figura 42 – Resultados de alguns pontos obtidos na 1ª tentativa.

3.1.4.2 Segunda abordagem

Face a estes resultados, a próxima tentativa foi recuperar as orientações fotogramétricas do bloco de fotografias e repetir a medição de pontos por correspondência automática de áreas e características. Para tal, aplicou-se a técnica da ATA em bloco por feixes perspectivados descrita na secção 3.1.2.2. As tolerâncias

definidas para este ajustamento foram 1,5 m para RMS e resíduos máximos em (X, Y, Z) para os pontos de controlo e uma precisão geral do ajustamento próximo da unidade.

Para isso foi necessário determinar os parâmetros de OI, as coordenadas foto de todos os pontos de apoio, as coordenadas objecto de todos os PF e os valores iniciais das incógnitas a determinar (parâmetros de OE de todas as fotos). Fruto desse trabalho já ter sido objecto de estudo principal noutra dissertação, procurou-se nesta tentativa refinar apenas as orientações já obtidas, não se realizando o levantamento de campo de pontos fotogramétricos. Os restantes elementos foram determinados da forma que a seguir se transcreve:

- ❖ Para se determinar os parâmetros de OI, foi criada no projecto uma nova câmara fotográfica analógica e foram medidas manualmente as coordenadas pixel de todas as marcas fiduciais de cada foto do bloco, Figura 43.

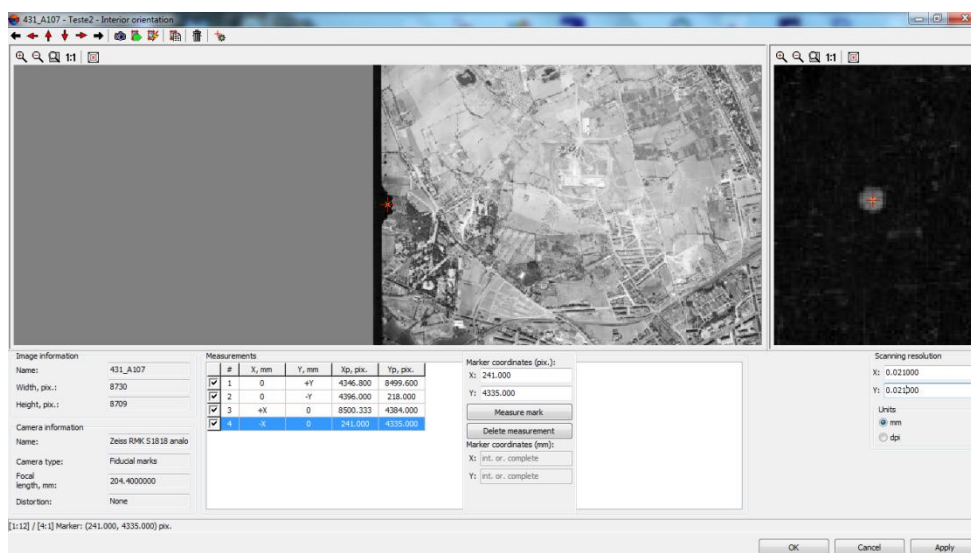


Figura 43 – Medição manual de marcas fiduciais das fotografias.

- ❖ As coordenadas foto dos pontos de apoio necessários para a ATA, foram medidos automaticamente pelo software com a opção “*automatic tie point measurement*”. Esta opção utiliza o algoritmo “*correlator*”, descrito anteriormente, para determinar as coordenadas pixel dos pontos homólogos. Os principais parâmetros configuráveis nesta função são o valor limite do coeficiente de correlação normalizado expresso em percentagem (*Correlation threshold*), o número de pontos por par estereoscópico e o erro máximo de paralaxe vertical admitido. O critério de busca de pontos conspícuos e de correlação, Figura 44, pode ser ajustado de acordo com as preferências do

utilizador, à semelhança das opções descritas anteriormente para o “correlator preset” da função “compute points automatic”.

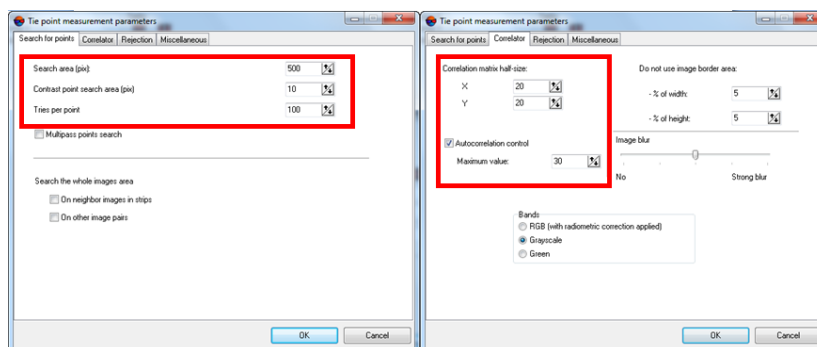


Figura 44 – Critério de busca de pontos conspícuos.

O controlo da qualidade dos dados medidos anteriormente é realizado através do cálculo da OR dos pares estereoscópicos, conforme descrito na alínea (10) da secção 3.1.2.1. No PHOTOMOD®, através do relatório de OR, é possível ver as estatísticas das medições dos pontos, detectar erros e corrigi-los. O relatório é gerado, considerando os parâmetros de controlo especificados pelo operador, nomeadamente:

- *Check vertical parallax*: limite de paralaxe vertical entre pontos homólogos
- *Check number of tie points*: Verificação do número mínimo de pontos de ligação e de passagem.

Após corrigir os erros identificados no relatório, as coordenadas pixel dos pontos homólogos medidos, Figura 45, são posteriormente transformadas em coordenadas foto, através da fórmula expressa no ponto (4) e da secção 3.1.2.1 de forma a serem utilizadas nos modelos matemáticos fotogramétricos durante a fase seguinte no processo de ajustamento.

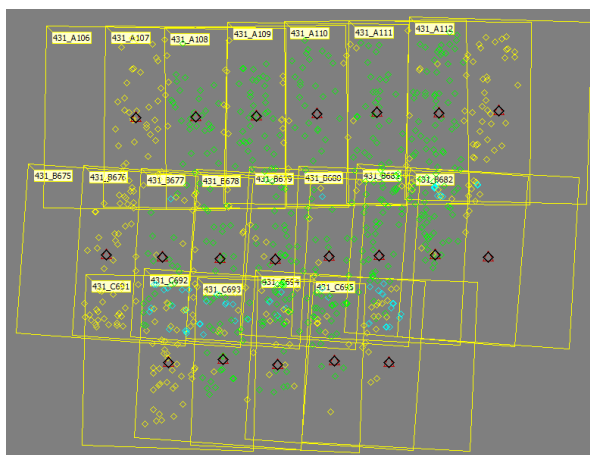


Figura 45 – Figura com “tie points” medidos

- ❖ Os parâmetros iniciais de orientação externa utilizados foram os obtidos em trabalhos anteriores conforme descrito em 1.4.1.

Após se determinar os pressupostos necessários à ATA (*Bundle Adjustment*), processou-se o ajustamento e avaliou-se os resultados de acordo com os indicadores numéricos de qualidade do ajustamento por feixes perspectivos, Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados ATA, 2ª abordagem.

Indicador Numérico	Diferenças			Precisão geral
	Centros de Projecção das fotos			Ajustamento (Sigma_0)
	X (metro)	Y (metro)	Z (metro)	
RMS	4,16	7,13	1,03	12.249
Resíduo Médio	2,9	5,4	0,755	
Resíduo Máximo	12,7	16,5	2,93	

De acordo com o apresentado na secção 3.1.2.3, a precisão geral do ajustamento excede claramente o valor de referência que deve ser próximo de 1, demonstrando que existem erros grosseiros ou sistemáticos no processo de ajustamento. O cálculo dos resíduos nesta tentativa foi efectuado para as coordenadas dos centros de projecção, considerando-se como valores observados os centros de projecção dos dados de base. Os elevados valores de resíduos e do sigma_0, confirmam a necessidade de realizar um novo ajustamento.

3.1.4.3 Terceira abordagem

Nesta tentativa, foram introduzidos no processo de ajustamento as coordenadas de pontos fotogramétricos, levantados na área de estudo. Planeou-se o seu levantamento de acordo com a configuração tradicional de PF's para blocos regulares [Redweik, 2010]: 1 PF duplo nos cantos do bloco, 1 PF de 3 em 3 modelos e 1 PF cada fiada, perfazendo um total de 16 PF's, (Figura 46). Foram também levantados 2 pontos de controlo da rede nacional geodésica (RNG) para avaliar a qualidade do levantamento. O principal desafio nesta fase foi identificar pontos visíveis nas fotografias aéreas de 1944, que se mantenham intactos nos dias de hoje, e que se encontrem localizados dentro das zonas definidas pelas regras da configuração de PF's para blocos regulares. A zona norte do bloco de fotografias (1ª fiada), por ser na altura maioritariamente rural, foi a que sofreu mais alterações nas últimas sete décadas, e, consequentemente a mais exigente.

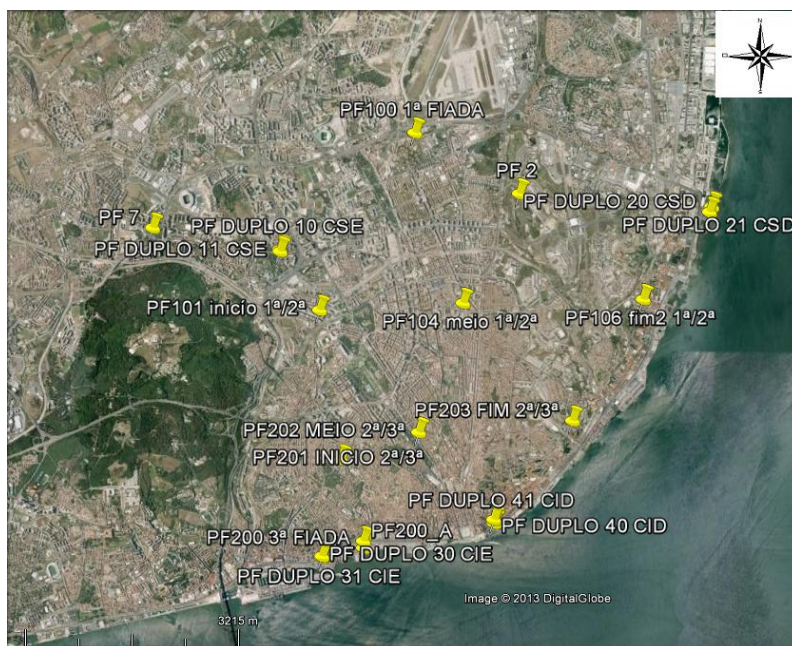


Figura 46 – Planeamento de Pontos Fotogramétricos
Fonte: [Google Earth, 2013]

Os 16 PF's e os 2 pontos de controlo foram determinados no campo através do método de posicionamento GPS, denominado por RTK. Para tal foi usado o sinal da rede de Sistemas de Estações de Referência GNSS Virtuais (SERVIR) do IGeoE, sendo cada ponto ocupado por sessões de 3 minutos. O equipamento GNSS utilizado foi o Trimble R8. Foi definido no seu controlador um novo projecto com o sistema de coordenadas Hayford – Gauss / Datum Lisboa – Militar, conforme mencionado anteriormente. A Tabela 6 mostra a precisão obtida nos dois pontos de controlo.

Tabela 6 – Resultados obtidos nos dois pontos de controlo.

	Pontos da Rede Geodésica Nacional					
	MARROCOS			POIAIS		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Valores Referência	107971.65	198241.67	103.76	113530.76	198729.74	111.28
Valores Medidos	107970.50	198242.35	103.21	113529.78	198730.44	110.76
Resíduos	1.15	-0.68	0.55	0.98	-0.70	0.52

As diferenças registadas reflectem os erros associados à transformação de datum que se processou, pelo *software* do equipamento, para se transformar as coordenadas do sistema WGS84 (sistema onde foram enviadas as correcções pela rede SERVIR) para HGDLx – Militar, usando uma transformação de Bursa-Wolf com os seguintes parâmetros, Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de transformação de coordenadas, Datum WGS84 para Datum Lisboa.

Datum WGS 84 para Datum Lisboa							
Parâmetros	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	Rot X (")	Rot Y (")	Rot Z (")	Factor de escala (ppm)
Valor	288.885	91.744	-126.244	1.69	0.41	0.21	4.6

Se compararmos esses resíduos com os valores de referência determinados pela DGT, quando se transformam coordenadas do Datum Lisboa para PT-TM06-ETRS89 (usando os 7 parâmetros oficiais na transformação de Bursa-Wolf) Tabela 8, pode-se concluir que os resíduos obtidos nos dois pontos de controlo estão dentro dos valores de referência.

Tabela 8 – Valores de referência da DGT para a transformação de coordenadas [IGEO, 2013].

Datum Lisboa para PT-TM06-ETRS89			
Resíduos	Este (m)	Norte (m)	Altitude Elipsoidal
RMS	1.40	1.49	0.25
Máximo Absoluto	5.10	4.15	1.06

Decidiu-se então fazer uma calibração local com base nas coordenadas de um ponto de controlo, para melhorar a sua exactidão. Para tal, aplicaram-se as correcções indicadas para o ponto Marrocos, da Tabela 6, a todas as medições efectuadas, obtendo-se os seguintes resíduos no ponto de controlo Poiais, Tabela 9 .

Tabela 9 – Resíduo registado no ponto de controlo Poiais, após calibração local.

	Pontos da Rede Geodésica Nacional					
	MARROCOS			POIAIS		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Valores Referência	107971.65	198241.67	103.76	113530.76	198729.74	111.28
Valores Medidos	107971.65	198241.67	103.76	113530.92	198729.76	111.31
Resíduos	0	0	0	-0.16	-0.02	-0.03

O maior erro registado (16 cm) é inferior a $\frac{1}{2}$ pixel na fotografia aérea (16,4 cm), aceitando-se por isso os resultados por permitirem uma precisão superior à capacidade de medição de coordenadas foto desses mesmos pontos no *software*, que no máximo é um pixel para o método de correlação cruzada (descrito na secção 3.1.1.3).



Figura 47 – PF: Planeamento em gabinete, levantamento no terreno e medição no Photomod®.

Após se obter as coordenadas terreno dos PF's, estes foram inseridos no projecto do PHOTOMOD® e foram posteriormente medidos em todas as imagens onde aparecem, Figura 47. Esta tarefa revelou-se especialmente delicada por depender da sensibilidade do operador. Como se pode verificar no exemplo ilustrado pela Figura 48, a identificação do pixel escolhido para marcar o PF 101 nas cinco fotos, não é consensual uma vez que a imagem perde muita resolução quando se faz zoom sobre uma zona. Isto deve-se, principalmente, à reduzida qualidade das fotografias.

Após marcar todos os PF's, processou-se novamente a ATA e obtiveram-se os resultados da Tabela 10.

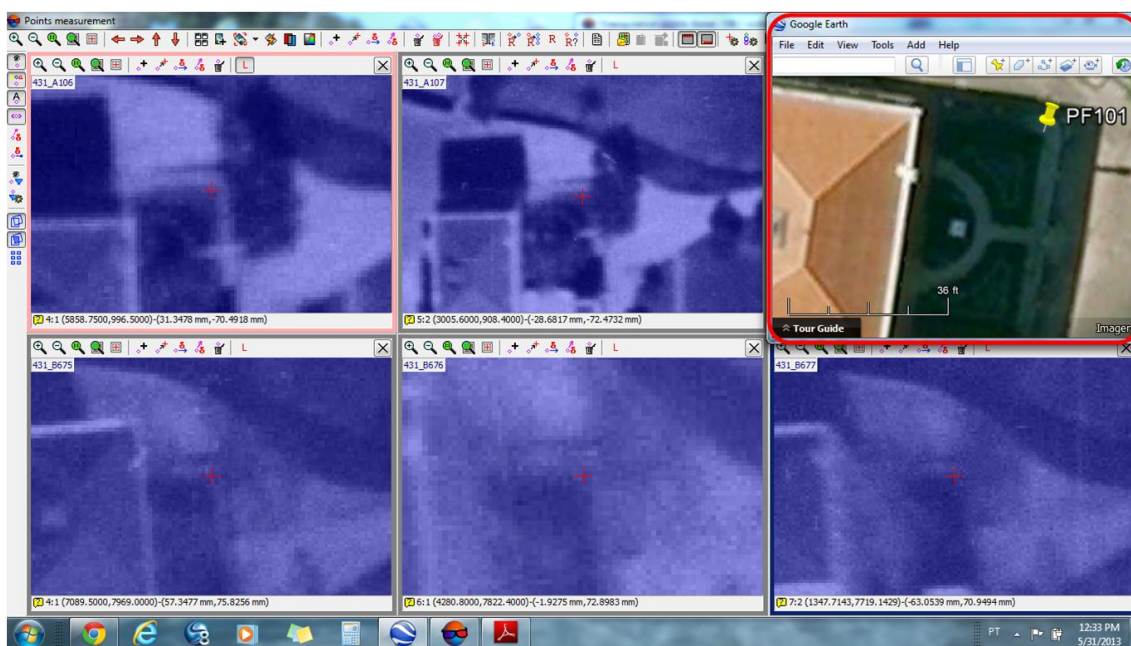


Figura 48 – Dificuldade em marcar o PF101 no Photomod®.

Tabela 10 – Resultados ATA, 3ª abordagem.

Indicador Numérico	Diferenças Pontos fotogramétricos			Precisão geral Ajustamento (Sigma_0)
	X (metro)	Y (metro)	Z (metro)	
RMS	5,07	6,86	1,82	9.710
Resíduo Médio	3,63	5,75	1,53	
Resíduo Máximo	11,1	11,6	3,74	

Embora a precisão geral do ajustamento tenha melhorado em relação à tentativa anterior, os resultados continuam muito aquém dos esperados, indiciando ainda erros grosseiros no ajustamento. Para além dos indicadores numéricos de qualidade, verificou-se que o bloco após ser ajustado apresentava fotografias com uma distorção acentuada e com dificuldade em se visualizar estereoscopicamente.

3.1.4.4 Quarta abordagem

Analisou-se então os parâmetros utilizados no “*Bundle Adjustment*” e excluiu-se a informação dos centros de projecção e orientações externas oriundas da informação base, Figura 49.

Com estas opções obteve-se os resultados da Tabela 11.

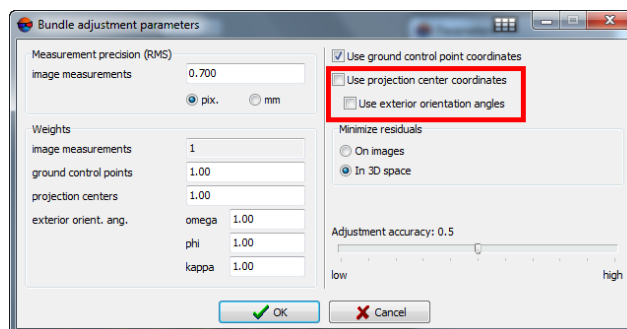


Figura 49 – Nova configuração para a ATA

Tabela 11 – Resultados ATA, 4ª abordagem.

Indicador Numérico	Diferenças Pontos fotogramétricos			Precisão geral Ajustamento (Sigma_0)
	X (metro)	Y (metro)	Z (metro)	
RMS	0,591	0,688	0,187	1.032
Resíduo Médio	0,492	0,593	0,128	
Resíduo Máximo	1,11	1,16	0,496	

O facto da precisão geral do ajustamento ser próximo de 1, conforme analisado na secção 3.1.2.3, demonstra que as medições das coordenadas foto foram precisas e

com resíduos pequenos quando ajustadas. Os resíduos obtidos para os pontos de controlo estão dentro das tolerâncias definidas e estão coerentes com as dificuldades relatadas na medição de coordenadas foto manualmente, nomeadamente dos pontos de controlo. O RMS demonstra que esse valor rondou os dois pixéis, o que equivale a 0.66 metros, em X e em Y.

O bloco ajustado não apresentava dificuldades na visualização estereoscópica, nem fotografias muito distorcidas. À semelhança da 1ª tentativa para criar uma malha de pontos cotados por correspondência automática de imagens, foi realizado um teste na mesma zona, concluindo-se que os pontos gerados automaticamente são agora coerentes a nível altimétrico, Figura 50.

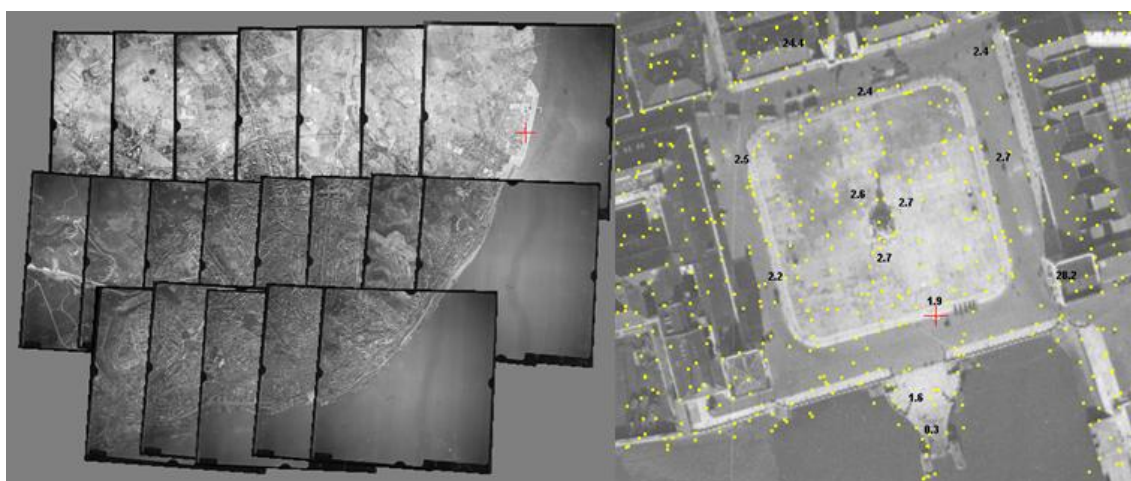


Figura 50 – Bloco ajustado pela 4ª tentativa e pontos cotados da zona do Terreiro do Paço.

Recuperadas as orientações correctas da cobertura aérea, gerou-se a nuvem de pontos inicial, à semelhança de 3.1.4.1. Foram medidos 529892 pontos, organizados por 17 pares estereoscópicos, Figura 51.

3.1.4.5 Filtragem da amostra inicial

A filtragem dos pontos que se encontrem sobre vegetação ou edifícios, da amostra primária, foi realizada com o operador “*Filter of buildings and vegetation*”. O algoritmo utilizado por este operador, filtra os objectos indesejados da amostra usando dois critérios distintos:

- (1) Aplica uma análise individual entre pontos, dentro de uma área pré-definida, e filtra de acordo com o ângulo de declive entre eles.
- (2) Define uma superfície suave, com base no raio de uma esfera, e identifica grupos de pontos com médias de cotas consideravelmente superiores ou

inferiores à vizinhança. Com este critério o parâmetro que determina a filtragem é a dimensão da área do grupo ou a distância máxima permitida entre um ponto e essa superfície.

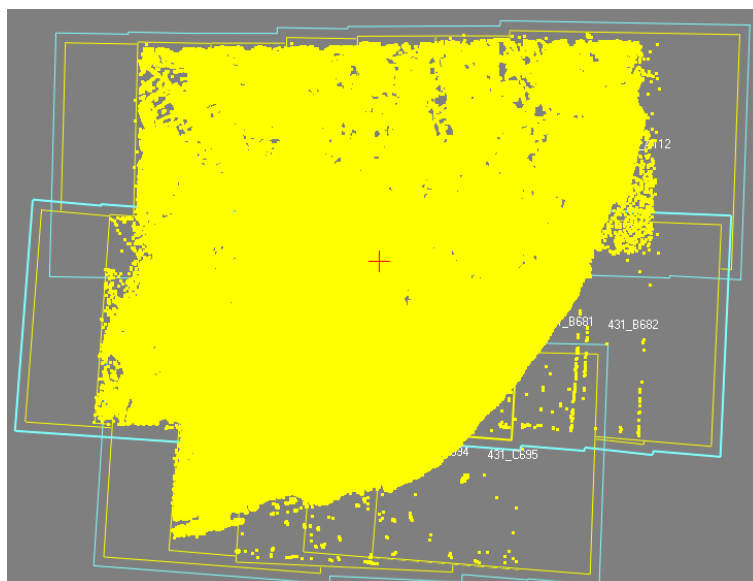


Figura 51 – Amostra primária de pontos.

O filtro tem 3 fases distintas que podem ser aplicadas separadamente ou todas em conjunto numa sequência:

- (1) *Basic filter*: usado para remover pontos isolados em relação a pontos adjacentes (árvores isoladas ou áreas de florestas). Esta fase aplica-se também para detectar a maior parte dos pontos em edifícios.
- (2) *Additional filter*: filtra pontos não consistentes com os pontos adjacentes que passaram da fase anterior.
- (3) *Detailed filter*: remove pontos de objectos pouco elevados, como pequenos edifícios ou carros.

Os parâmetros de cada fase podem ser ajustados, Figura 52. As principais opções são:

- ❖ *Distance of points mutual influence*: raio do círculo onde os pontos vão ser analisados. Estes valores são calculados automaticamente de acordo com a distância média entre os pontos da amostra.
- ❖ *Filter surge (up/down)*: filtragem dos pontos pela direcção com que surgem. Se a opção “up” estiver activa, um grupo de pontos com cotas inferiores à vizinhança não é filtrado.
- ❖ *Spikes only*: Com esta opção os pontos são filtrados apenas por dois critérios, ângulo de inclinação e distância de mútua influência.

- ❖ *Maximum área of flat surges*: os grupos de pontos que formem superfícies suaves planas e que estejam deslocados da média da vizinhança, são detectados se a área dessa superfície for inferior a um parâmetro definido pelo operador. Normalmente são pontos localizados em telhados planos de edifícios.
- ❖ *Intermediate smoothing radius*: é o raio da esfera que define a superfície suave.
- ❖ *Allowed point deviation from smoothed surface*: define a distância máxima que o ponto se pode encontrar para não ser filtrado.
- ❖ *Maximum área of inclined surges*: os grupos de pontos que formem superfícies inclinadas e que estejam deslocados da média da vizinhança, são detectados se a área dessa superfície for inferior a um parâmetro definido pelo operador.

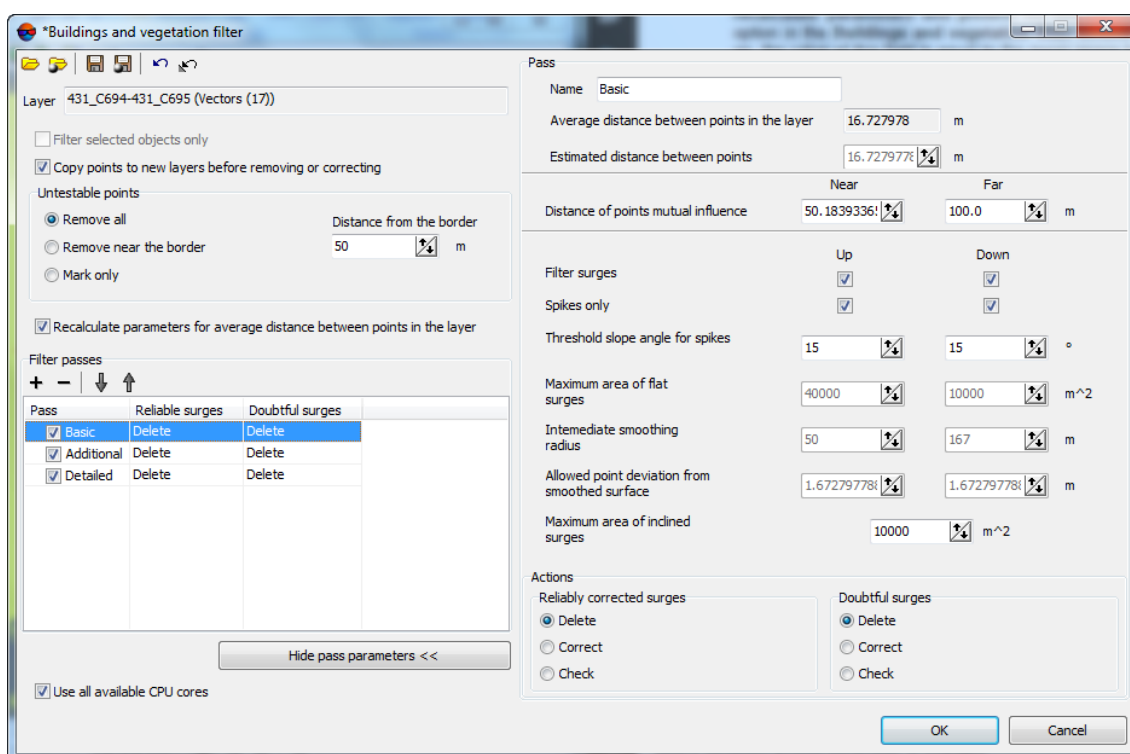


Figura 52 – Parâmetros do filtro: “Filter of buildings and vegetation”.

Após a aplicação do filtro automático, verificou-se que em algumas zonas, os pontos existentes não representavam fielmente terreno, havendo áreas com poucos pontos. Verificou-se também que nas zonas densamente urbanas, nomeadamente no centro histórico da cidade com ruas muito estreitas, o processo automático de filtragem não funcionou adequadamente, mantendo-se muitos pontos medidos no topo de edifícios. Foi desenvolvido então um trabalho de completamento manual e correcção de pontos nessas áreas, Figura 53, de forma a minimizar essas lacunas e erros. Este foi um

trabalho bastante moroso de onde resultou um total de 273000 pontos, entre medições automáticas e manuais.

Esta fase do trabalho nunca está concluída, podendo sempre ser melhorada. No entanto, face à dimensão do trabalho e ao recurso finito que é o tempo, foi necessário avançar para outras etapas.

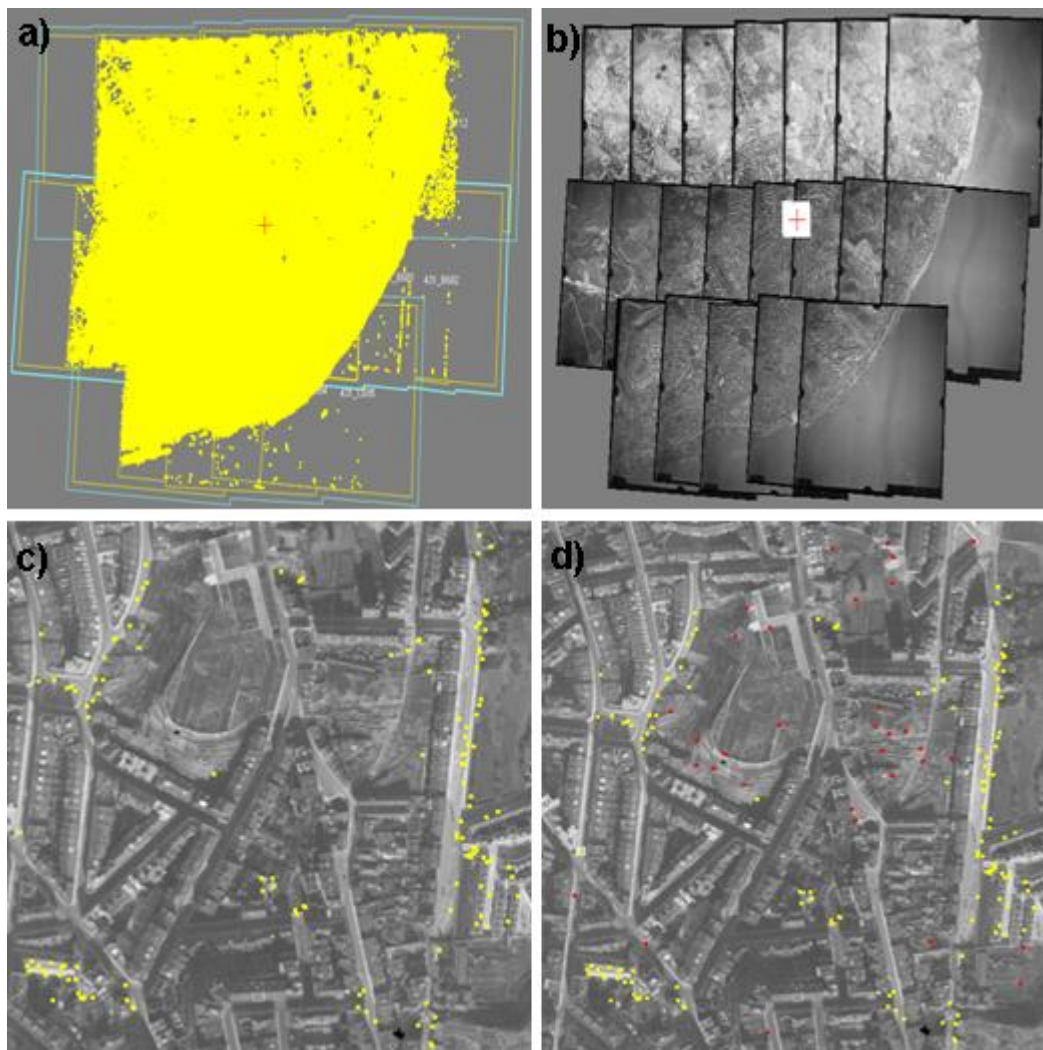


Figura 53 – Processo de filtragem e completamento: a) Nuvem de pontos original; b) Selecção de uma área de trabalho; c) pontos amarelos: resultado da filtragem com o filtro automático; d) pontos vermelhos: completamento de lacunas.

3.2 Interpolação da amostra primária

A amostra de pontos primária, que se obteve anteriormente, é um conjunto de valores pontuais que representam pontos de uma grandeza de variação contínua, o terreno. As várias técnicas de interpolação que existem visam transformar esses valores discretos numa superfície contínua, dependendo o resultado final da técnica aplicada. Quando é possível medir directamente toda a superfície, como é o caso das técnicas

de *laser scanning*, não são necessários métodos de interpolação espacial. Na secção 3.2.1 analisam-se os vários métodos de interpolação, determinísticos e probabilísticos, utilizados nesta dissertação. O *software* usado é apresentado em 3.2.3, e por último, todos os procedimentos e resultados são descritos em 3.2.4.

3.2.1 Técnicas de interpolação

Os vários métodos de interpolação utilizados podem ser determinísticos ou probabilísticos. O conceito subjacente aos primeiros é que a superfície é ajustada ao conjunto de valores pontuais, tendo em consideração que o que está mais próximo deve ser mais semelhante que o que está distante. Nesta análise não são avaliados os efeitos da correlação espacial entre os valores. Nos métodos probabilísticos, onde se destaca a geoestatística, utiliza-se funções aleatórias e investiga-se a autocorrelação espacial dos valores pontuais para se modelar a variabilidade espacial do fenómeno na área de estudo [Matos, 2008].

Segundo Matos [2008], grande parte da responsabilidade no sucesso de um método de interpolação reside na possibilidade de aplicação do conhecimento que se possa inferir sobre a sua distribuição espacial. Com base nesta afirmação pode-se deduzir que os métodos determinísticos partem em desvantagem, uma vez que a amostra pontual de valores é tratada sem recurso a qualquer informação adicional que se possa obter da análise dos mesmos, ou derivada do conhecimento do fenómeno em estudo.

Neste trabalho, foi estudada uma técnica representativa de cada método de interpolação, a *Inverse Distance Weight* (IDW) e o Kriging.

O IDW é um método de interpolação determinístico, baseado em modelos matemáticos, e calcula o valor de cada célula da superfície de acordo com uma combinação dos valores de células vizinhas, ponderada de forma inversamente proporcional à distância. O valor estimado \hat{v} é calculado da seguinte forma:

$$\hat{v} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (30)$$

Onde:

- v_1, \dots, v_n : são os valores conhecidos.

- d_1, \dots, d_n : são as distâncias a que se encontram os valores conhecidos do ponto a estimar.

O kriging é um método de interpolação probabilístico, que considera a direcção e a continuidade do fenómeno espacial. Neste tipo de interpoladores, assume-se que:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (31)$$

Onde:

- $Z(s)$: é a variável com distribuição em função da localização s .
- $\mu(s)$: é a componente determinística (distribuição global do fenómeno espacial).
- $\varepsilon(s)$: é a componente aleatória (variação local dentro de uma área).

Existem diferentes tipos de Kriging, consoante as hipóteses assumidas para $\mu(s)$. Se $\mu(s)$ for constante e conhecido designa-se de kriging simples. Se $\mu(s)$ variar mas for estacionário numa vizinhança centrada no local onde se pretende estimar o valor da variável então designa-se por kriging ordinário. Se $\mu(s)$ variar e depender de uma variável externa designa-se por kriging com deriva externa [Matos, 2008].

De uma forma geral, a estimativa de valores para um ponto s , é determinado pelo método de kriging, através de uma média ponderada dos valores de todas as amostras. Na técnica de kriging ordinário, utilizada nesta dissertação, os pesos associados a cada amostra, λ_i , apresentam soma igual a 1. A expressão geral do método de kriging é dada por:

$$\hat{Z}(s) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (32)$$

Em que os pesos são escolhidos de forma a minimizar a variância de *kriging* dada por:

$$\widehat{\sigma_k^2}(s) = Var(\hat{Z}(s) - Z(s)) \quad (33)$$

Quando se utiliza interpoladores kriging, primeiro é necessário determinar os parâmetros do modelo de variabilidade espacial da área em estudo. A função utilizada para verificar a continuidade dos valores experimentais para diferentes direcções no espaço é o variograma, $\gamma(h)$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s_i) - Z(s_i + h)]^2 \quad (34)$$

Onde:

- $Z(s_i)$: valores amostrados no local s_i .
- N : número de pares da amostra
- h : distância entre os pontos de um par.

Para uma distribuição de pontos irregular, como é o caso do resultado da secção 3.1.4.5, não se pode usar um valor de h exacto, mas sim um intervalo de valores. A representação gráfica da função variograma, (Figura 54, é um instrumento importante para avaliar o comportamento espacial da variável em estudo. Permite avaliar se os valores mais próximos são mais semelhantes entre si do que valores mais afastados, ou seja, reflete o comportamento da variável em função da proximidade espacial.

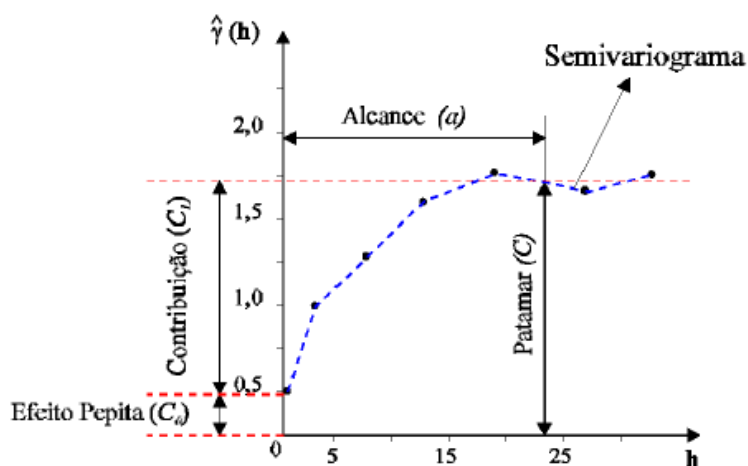


Figura 54 – Representação gráfica da função variograma
Fonte: [Catita , 2012]

A distribuição dos pontos do variograma, pode posteriormente ser aproximada por funções, como a esférica, circular, gaussiana, entre outras. Estas funções são usadas para descrever a evolução da variância entre os pares de pontos, desde a origem até ao patamar (C). A distância para a qual se atinge o patamar, o alcance (a), indica a distância máxima entre pontos para a qual eles continuam a ser correlacionados. O efeito pepita indica se a aproximação tem um valor não nulo na origem.

O modelo esférico utilizado nesta tese, é definido por:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h \leq a \\ c & \text{para } h > a. \end{cases} \quad (35)$$

Onde:

- c : é o valor no patamar
- a : é o alcance para o qual se atinge o patamar.

A análise do variograma, permite parametrizar a aplicação da interpolação, definindo-se [Matos, 2008; Catita, 2012]:

- O número de pontos necessários para estimar a média local
- Qual a forma e orientação da janela de vizinhança para uma boa estimativa.

3.2.2 Análise de resultados das técnicas de interpolação

A avaliação da qualidade da superfície gerada pelos métodos de interpolação descritos anteriormente, pode ser efectuada de duas formas distintas [Catita, 2012]:

- (1) *Cross-validation*: Eliminam-se uma das observações do processo de interpolação e usam-se as restantes para criar a superfície interpolada. Pode-se aplicar este método a todas as observações, eliminando uma de cada vez. A avaliação da superfície de interpolação com este método é realizado com a análise de resíduos entre as observações e as respectivas estimativas. Os indicadores numéricos utilizados são o RMS, a média, entre outros.
- (2) *Validação*: Este método, aplica o mesmo conceito da *cross-validation*, mas a um conjunto específico de observações, que não entraram na interpolação. Os valores desse conjunto de pontos de teste são determinados com a superfície interpolada e são determinados os resíduos para avaliar a qualidade da interpolação.

3.2.3 Software ARCGIS

Para gerar o MDT com base na interpolação da amostra primária, usou-se o *software* ARCGIS®. Este, foi também utilizado no capítulo 4, para realizar as comparações entre os dois MDT obtidos por técnicas diferentes.

Este *software* foi desenvolvido pela empresa americana *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), no fim da década de 1990, e é uma plataforma primária para realizar as análises em ambiente SIG. As principais operações possíveis de realizar com este *software* são [ESRI, 2013]:

- Utilização de várias projecções cartográficas definidas no momento de apresentação dos dados no ecrã, sem necessidade de efectuar transformações físicas nos dados originais;
- linguagem de programação orientada para objectos;
- edição de dados tabulares;
- análise espaciais de dados vectoriais ou raster;

3.2.4 Execução e resultados

De forma a escolher a técnica de interpolação mais adequada aos dados disponíveis, decidiu-se realizar um estudo comparativo entre os dois métodos descritos em 3.2.1, o IDW e o kriging ordinário. Como os resultados da técnica de kriging dependem substancialmente das parametrizações adoptadas, foram também analisadas quais as opções que contribuem para uma melhor qualidade de interpolação

Numa primeira fase retirou-se um extracto da amostra primária de dados com a opção “*Subset features*”. Esse conjunto aleatório de pontos não entraram no processo de ajustamento e correspondem a 1% dos dados primários, ou seja a 2730 pontos. Posteriormente, estes foram utilizados para avaliar a qualidade geral da interpolação, através da técnica de validação.

A interpolação com o método determinístico IDW, foi construído na opção “*Geostatistical Analyst*”. Na Figura 55 pode-se observar um exemplo de quais os pontos utilizados para se interpolar a localização definida pela marca e os respectivos pesos, calculados através do modelo matemático explicado em 3.2.1.

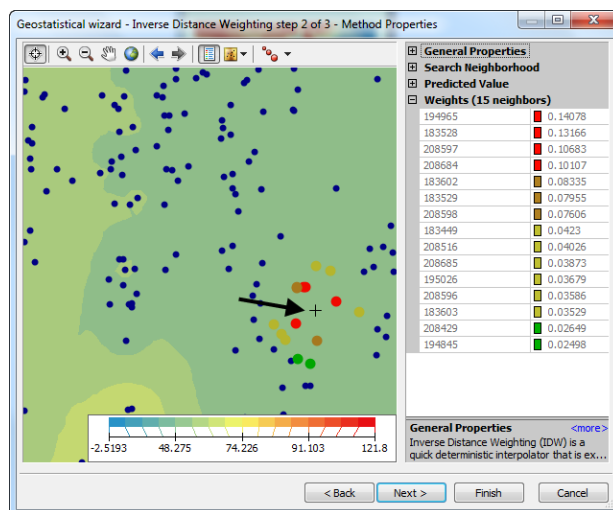


Figura 55 – IDW: Pontos utilizados para determinar o valor da localização assinalada como uma cruz e os respectivos pesos.

Para definir qual o melhor método probabilístico kriging a usar, assim como para detectar valores anómalos, anisotropias, tendências nos valores e analisar a autocorrelação espacial, realizou-se previamente uma análise exploratória dos dados iniciais.

A identificação de tendência nos dados, ou distribuição global do fenómeno (μ), é fundamental para a qualidade dos resultados de interpolação com técnicas de kriging, uma vez que, como referido anteriormente em 3.2.1, uma das hipóteses fundamentais à modelação do variograma (componente aleatória (ε) do interpolador) é a ausência dessa tendência. A ferramenta “*Trend Analysis*” identificou a existência de uma tendência espacial (μ) não constante, como se pode ver ao longo do eixo do X e Y na Figura 56, mas estacionária numa vizinhança onde se pretende estimar o valor da variável. Face a esta observação, o método de kriging escolhido para esta interpolação foi o kriging ordinário.

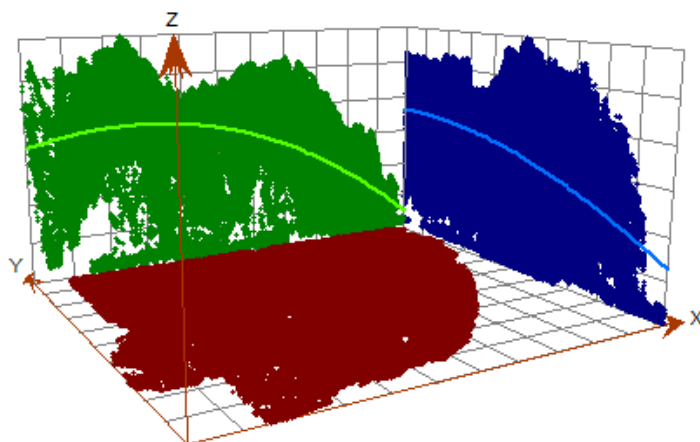


Figura 56 – Análise da normalidade dos dados: Análise de tendências.

Para verificar a existência ou não de efeitos direcionais, ou seja anisotropias, e assim definir a melhor forma e dimensão da janela de pesquisa a usar, usou-se o mapa de valores produzida pela função variograma definida em 3.2.1. No mapa produzido por essa função é possível verificar que a forma de pesquisar os pontos vizinhos altera-se (circulo ou elipse) consoante se defina o fenómeno como isotrópico (a componente aleatória do fenómeno só depende da distância, Figura 57 (c)), ou anisótropo (a componente aleatória do fenómeno depende da distância e direcção, Figura 57 (b)). Como se pode verificar, o mapa de variância produzido pela função variograma indicia a existência de efeitos direcionais.

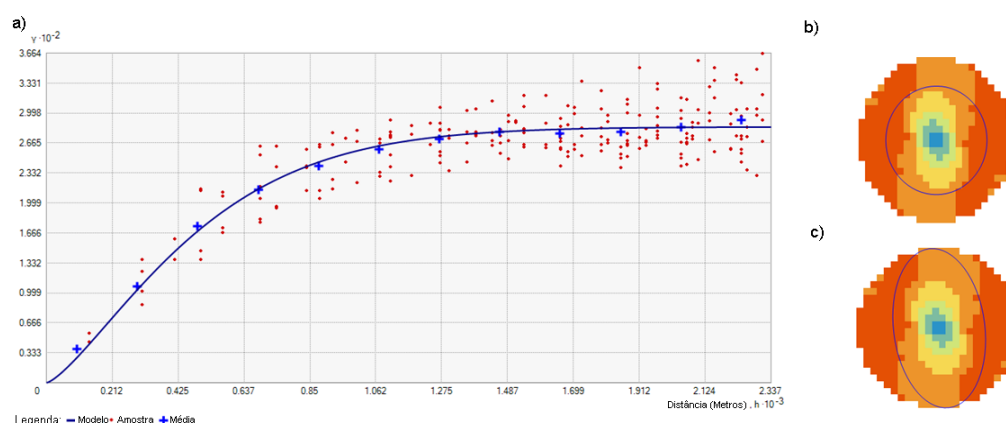


Figura 57 – Análise de existência de efeitos direcionais nos dados: a) variograma; b) isotropia; c) anisotropia.

A distribuição dos pontos do variograma, Figura 57 (a), foi descrita pelo modelo teórico esférico por ser a que melhor se ajusta aos pontos. Esta função, como descrito em 3.2.1, indica a distância máxima entre pontos para a qual eles continuam a ser correlacionados e que deve ser utilizada durante o processo de interpolação. O valor de alcance usado foi 2337 metros, que equivale a um patamar 293.09.

Para o interpolador kriging, existem 3 opções no *software* para se retirar a tendência dos dados, através de uma superfície de 1^a, 2^a ou 3^a ordem. Para estudar a influência desta opção e da escolha da forma da janela de pesquisa, círculo ou elipse, realizaram-se vários testes e analisaram-se os resultados com as técnicas de controlo de qualidade com base em resíduos (secção 3.2.2), resumindo-se os seus resultados Tabela 12.

As duas técnicas de controlo de qualidade usadas apresentam resultados coerentes entre si, utilizando-se dessa forma os resultados da validação para as conclusões, por estes representarem uma amostra superior da área de estudo, mais precisamente 2730 pontos. Em relação à escolha do método determinístico (IDW) ou probabilístico (Kriging), conclui-se que de forma geral se atinge melhores resultados de RMS com o

probabilístico. Este resultado é esperado, uma vez que comprova a fundamentação teórica onde se afirma que o conhecimento da distribuição espacial do fenómeno contribui para melhores resultados de interpolação.

Tabela 12 – Testes com interpoladores espaciais.

Técnica	Indicador qualidade	IDW	Kriging							
			Anisotropia				Isotropia			
			Com tendência	Sem tendência			Com tendência	Sem tendência		
				1ªord	2ªord	3ªord		1ªord	2ªord	3ªord
Cross validation	Média (m)	-0.036	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001	0.021	-0.001	-0.001	-0.001
	RMS (m)	1.261	1.242	1.212	1.122	1.326	1.541	1.217	1.312	1.328
Validação	Média (m)	0.060	0.004	0.036	0.028	0.037	0.031	0.039	0.035	0.035
	RMS (m)	1.175	1.493	1.149	1.069	1.163	1.628	1.153	1.118	1.119

Outra conclusão que se pode retirar é que a parametrização efectuada pelo operador nos métodos probabilísticos, é crucial para os resultados finais obtidos. Assim é importante efectuar uma análise exploratória dos dados, para escolher o tipo de interpolador kriging a usar e os seus parâmetros. A análise exploratória identificou uma tendência nos dados. Este facto é comprovado pelos resultados obtidos, uma vez que a utilização do interpolador sem remoção da tendência espacial atinge sempre piores resultados (RMS superior). Outra característica identificada foi um efeito direcional da variância, confirmado pelos melhores resultados obtidos em todos os testes realizados com uma janela de pesquisa de vizinhança (elipse), adaptada ao carácter anisótropo do fenómeno. Relativamente à forma como a tendência é retirada, obteve-se melhores resultados no teste da superfície de 2ª ordem, com um RMS de 1.069 metros.

Face ao exposto, a superfície interpolada utilizada como MDT Foto, foi a que resultou de uma interpolação por kriging ordinário com remoção de tendência de 2ª ordem e com anisotropia. Esta superfície foi obtida com um espaçamento de 1mx1m, Figura 58.

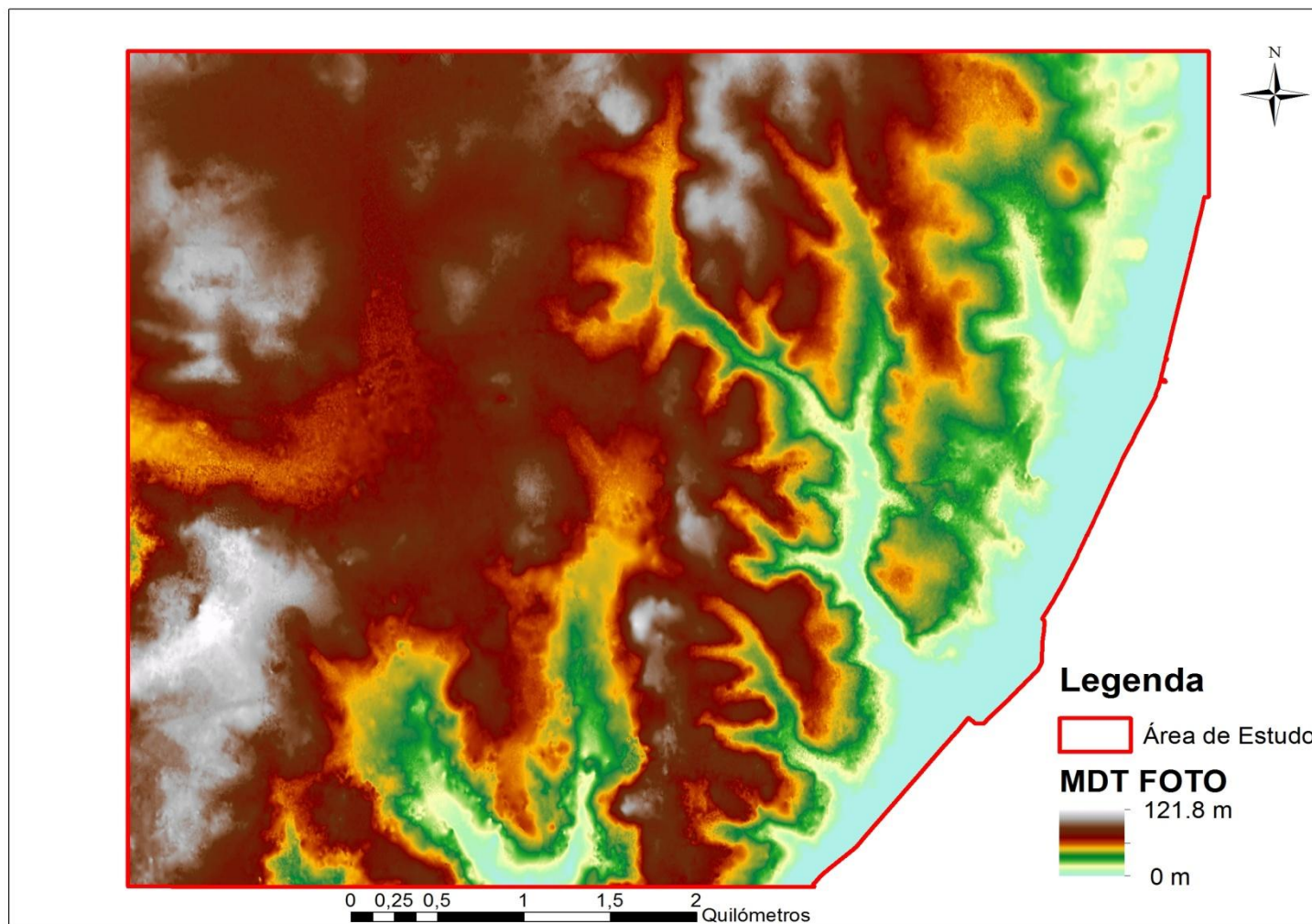


Figura 58 – MDT Foto.

4 Comparação de MDT

A análise de aterros e escavações entre as duas épocas de estudo é descrita neste capítulo. A metodologia utilizada para analisar os resultados da comparação entre modelos, subdivide-se em quatro fases. Primeiro procedeu-se a uma transformação de coordenadas de todos os MDT para um sistema comum. De seguida produziu-se um mapa de zonas de aterro e escavação através da comparação entre o MDT Foto e o MDT Lidar. Depois, foram identificados os principais erros que contribuem para as zonas de aterro e escavação e a sua influência nos resultados finais. Por último validaram-se os resultados obtidos com um mapa produzido por fotointerpretação estereoscópica em trabalhos anteriores, mais especificamente a carta de aterros descrita em 1.1.4.

De realçar que o MDT LiDAR obtido no capítulo 2, ao contrário do sugerido por [Briese, 2010] na secção 2.1.5, não foi sujeito a um processo de edição manual para corrigir falhas de classificação provocadas pela complexidade do terreno, principalmente em áreas urbanas. No MDT Foto foi realizada uma edição manual, embora de forma bastante limitada, como foi apresentado na secção 3.1.4.5.

4.1 Transformação para sistema de coordenadas comum

Todas as análises foram efectuadas no *software* ARCGIS®, conforme mencionado anteriormente, no sistema de coordenadas PT – TM06/ETRS89. O MDT Lidar, por já estar nesse sistema de coordenadas, não foi necessário transformar, no entanto, o MDT Foto encontra-se num sistema diferente, o HGDLx – Militar.

Existem várias formas de efectuar a transformação de coordenadas entre esses data. Optou-se pelo método das grelhas em formato Ntv2 por se obter, segundo a DGT [2013], “precisões normalmente superiores às outras transformações”. A precisão da transformação, obtida com base em 130 vértices geodésicos que não entraram no cálculo das grelhas, foi a patente na Tabela 13.

Tabela 13 – Precisão de transformação pelo método das grelhas [DGT, 2013].

Transformação para PT-TM06-ETRS89 – Método das grelhas		
Resíduos	DLx	D73
E.M.Q (m)	0.09	0.06
Máximo Absoluto (m)	0.30	0.16

Segundo esse método, a transformação de coordenadas entre dois sistemas de referência é feita por interpolação, a partir de diferenças de coordenadas em pontos distribuídos em grelha regular (com espaçamento de 1',2), ajustando-se localmente à rede geodésica. A grelha de diferenças de coordenadas é calculada por interpolação espacial (kriging) a partir de pontos com coordenadas conhecidas nos dois sistemas, mais especificamente os 1129 vértices da rede geodésica nacional (RGN).

Para se proceder à transformação de coordenadas do MDT Foto, descarregou-se o ficheiro para a transformação de Datum Lisboa para PT-TM06/ETRS89 (DLx_ETRS89_geo.gsb), disponível em DGT [2013], e configurou-se no *software* esta nova transformação com a opção “*Create Custom Geographic Transformation*”.

4.2 Mapa de aterros e escavações

Nesta fase, procedeu-se então à comparação entre modelos. Para responder aos objectivos específicos desta dissertação, (7) e (8) da secção 1.2, uma simples operação de cálculo de volumes não era suficiente. Mais do que identificar zonas na área de estudo que correspondam a aterros ou escavações, é necessário medir o volume de terra transferido. Uma vez que cada pixel possui uma área de 1m² nos dois MTD, a diferença entre as duas superfícies do terreno vai dar o volume de terra que foi alterado nessa unidade de terreno, no período compreendido entre 1944 e 2006. Essa informação permite construir um mapa de aterros e escavações, onde cada pixel equivale à diferença de volume de terra, acrescido dos erros associados a cada modelo. A opção utilizada no ARCGIS® foi a “*Minus*”, representada pela seguinte equação (36):

$$\text{Mapa aterros e escavações} = \text{MDT Foto} - \text{MDT LiDAR} \quad (36)$$

A Figura 59, mostra os resultados da comparação entre os dois modelos digitais de terreno, o MDT Foto e o MDT Lidar. Cada pixel desse mapa traduz as diferenças volumétricas entre o período de 1944 e 2006.

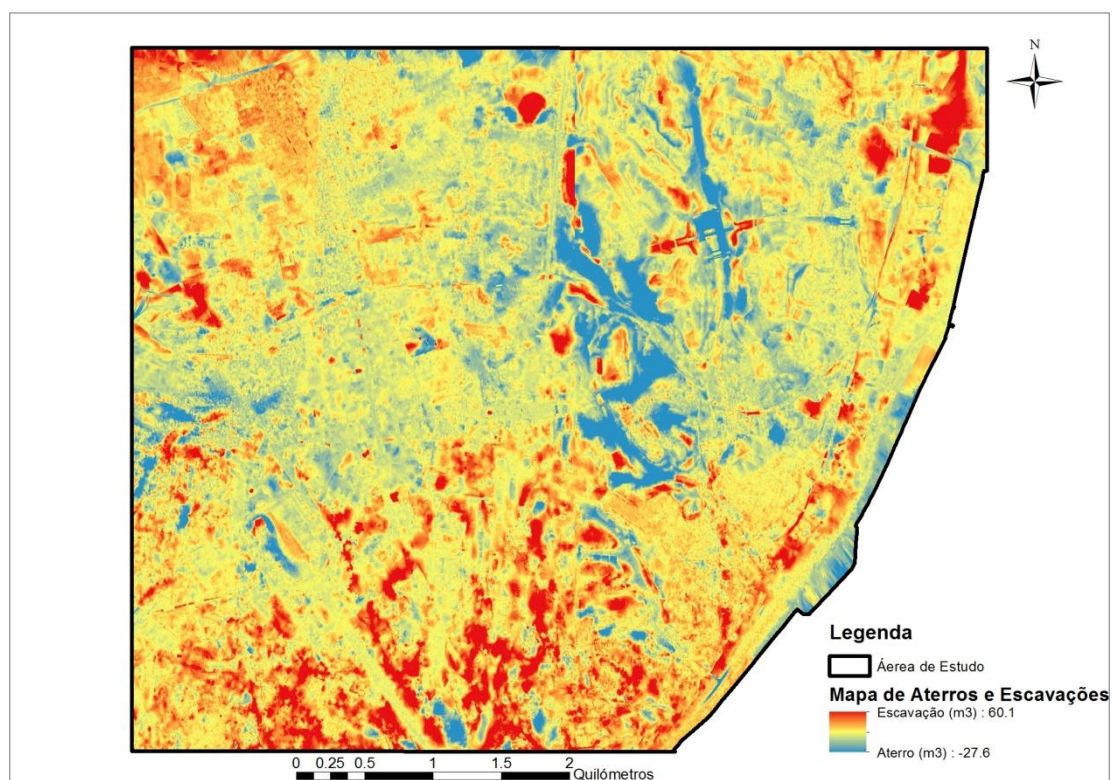


Figura 59 – Mapa de aterros e escavações.

4.3 Identificação dos principais erros

De forma a melhor se compreender a qualidade do produto gerado, a análise das zonas de aterro e de escavação vai ser realizada separadamente, uma vez que os erros que contribuem para cada tipo de zona tem origens diferentes (MDT Foto e MDT LiDAR). A principal de fonte de erros, como se verá adiante, é provocada por filtragens imprecisas da nuvem de dados primária, independentemente de ser de origem LiDAR ou fotografia aérea. Considerando que um edifício em Lisboa tem uma altura mínima de 3 metros, os erros provocados por uma incorrecta extracção desses objectos terão essa ordem de valores, assim, estudou-se a influência dos principais erros para zonas de aterro ou escavação com volumes superiores a 3 m^3 , em valores absolutos.

Os erros de classificação provocados pelo MDT LiDAR são facilmente identificáveis, uma vez que existe uma superfície de referência da mesma data que está “livre” dos mesmos, o MDT IGeoE. Assim, a análise da influência dos erros do MDT LiDAR nas zonas identificadas como aterro ou escavação é relativamente simples de efectuar e de se extrair conclusões.

Relativamente aos erros de classificação provocados pelo MDT Foto, estes são difíceis de mensurar e de identificar, uma vez que não existe uma superfície de referência datada daquela época. Este facto remete para uma avaliação sustentada numa análise meramente visual.

4.3.1 Zonas de aterros

Os principais erros que contribuem para uma detecção incorrecta de zonas de aterro são as falhas na classificação do filtro LiDAR e consequente extracção imprecisa dos edifícios presentes na amostra primária. Outra causa que poderá provocar identificação incorrecta de zonas de aterros são medições insuficientes de pontos nas fotografias aéreas para descrever a orografia do terreno, originando zonas com representações do terreno inferiores à realidade.

No que se refere às falhas na classificação do filtro LiDAR (previamente identificados na secção 2.6.4.2), pode-se verificar na Figura 60, que estas contribuem pouco para zonas identificadas como aterros, havendo poucas zonas de sobreposição entre erros de filtragem LiDAR e zonas de aterro. Realça-se apenas as zonas identificadas com um rectângulo vermelho e que identificam viadutos não extraídos pelo filtro LiDAR e as zonas identificadas com um rectângulo verde que identificam edifícios que não foram totalmente extraídos pelo filtro por terem formas complexas.

Relativamente aos erros provocados por medições insuficientes nas fotografias aéreas antigas, estas situações são raras porque a cobertura de pontos é bastante densa (foram medidos 273 000 pontos na área de estudo). Identificou-se apenas uma zona com cobertura deficiente, representada na imagem por um círculo cor-de-rosa.

Concluiu-se assim que a identificação de zonas de aterro não é muito afectada pelos erros detectados nos modelos que lhe dão origem. Isto justifica-se porque o modelo que mais contribui para a identificação destas zonas é o MDT LiDAR, cujo algoritmo de filtragem teve uma prestação bastante positiva.

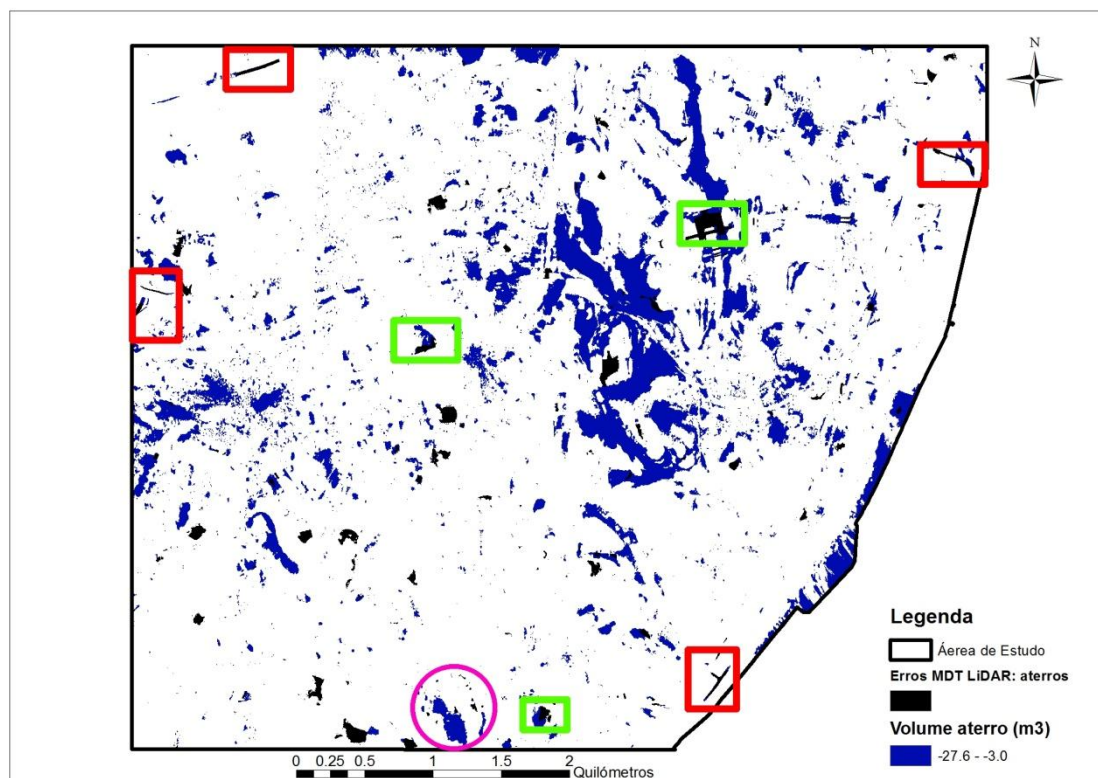


Figura 60 – Erros nas zonas de aterros.

4.3.2 Zonas de escavações

Relativamente ao mapa de escavações, Figura 61, existem duas fontes de erros principais que originam classificações incorrectas de zonas de escavação. São o caso da extracção incompleta de edifícios pelas operações de filtragem no MDT Foto, ou, a filtragem errada de zonas correspondentes a “terreno” pelo filtro MDT LiDAR.

A influência do MDT LiDAR, nas zonas identificadas incorrectamente como aterros, é facilmente identificável por comparação do MDT LiDAR com o MDT IGeoE. Essas diferenças (representadas a preto), identificam uma de duas situações:

- (1) os pixéis “solo” que foram incorrectamente filtradas pelo algoritmo LiDAR
- (2) zonas que representam passagens inferiores, como tuneis (uma vez que estes objectos não são representadas no MDT do IGeoE).

Na Figura 61, estão sinalizados com um rectângulo azul as falhas detectadas na filtragem pelo algoritmo LiDAR, que correspondem efectivamente a zonas do terreno descritas em (1). Essas nove áreas não são significativas no universo de zonas de escavação identificadas.

Os erros provenientes de uma filtragem incompleta no MDT Foto, apenas tem expressão em zonas densamente urbanizadas ou florestadas em 1944. Para as localizar, começou-se por delimitar a zona do perímetro urbano densamente urbanizado na cidade de Lisboa à época das fotografias. Esta operação foi realizada no PHOTOMOD®, sendo depois importada para o *software* SIG.

O facto de existir uma grande aglomeração de zonas de escavação dentro desse perímetro, principalmente na zona sul da área de estudo, que corresponde uma zona da cidade densamente urbanizada com declive acentuado e ruas estreitas, indicia a existência de erros de filtragem no MDT Foto. Isto porque não é expectável que se tenham registado muitas alterações na zona mais antiga da cidade, uma vez que o normal crescimento da cidade foi para zonas periféricas.

A forma como foi elaborada a filtragem da nuvem de pontos e os seus resultados, cujos procedimentos foram descritos em 3.1.4.5, indiciam que a maior fonte de erro registada na comparação entre o MDT LiDAR e o MDT Foto reside exactamente neste ponto. Da análise das zonas de escavação identificadas, detectou-se que as zonas sinalizadas com um círculo cor-de-rosa não representam escavações reais, mas sim erros de filtragem do MDT Foto.

O círculo localizado na zona norte corresponde à zona arborizada do Campo Grande e na zona sul, dentro do perímetro, a zonas edificadas que foram filtradas de forma incompleta.

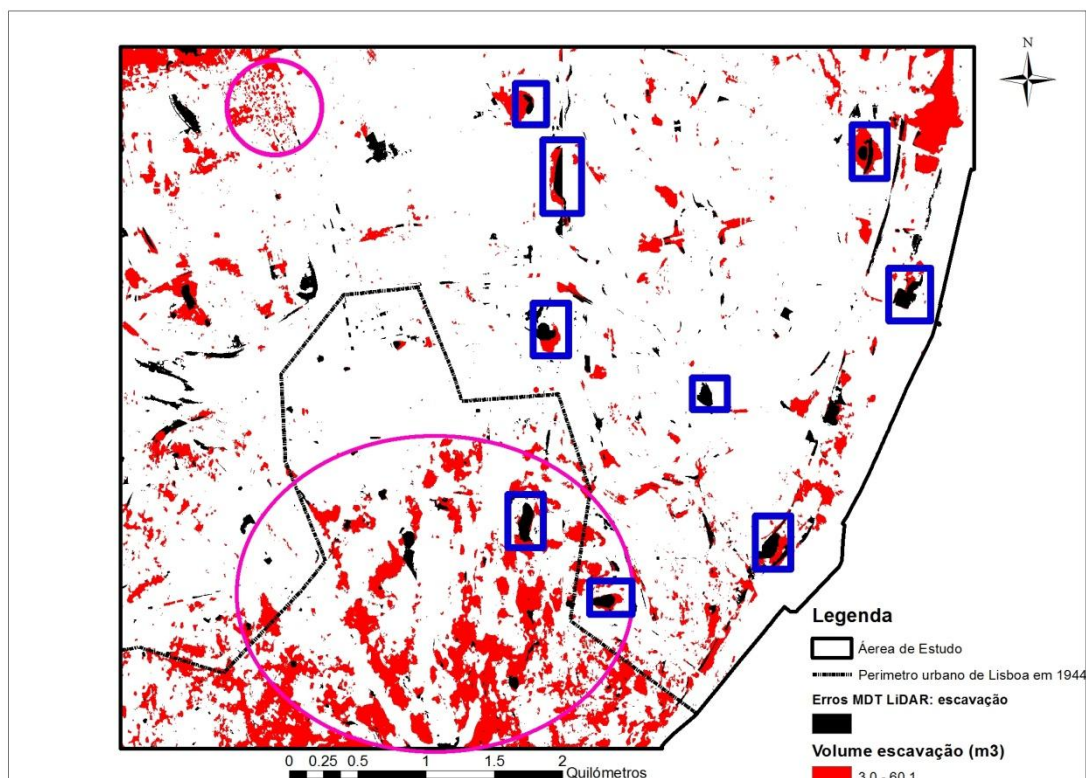


Figura 61 – Erros nas zonas de escavações.

Sendo uma das características do filtro utilizado na elaboração do MDT Foto, a exclusão de pontos de acordo com o seu declive, é normal que as zonas com maior declive correspondam a áreas de erro. A Figura 62, representa a carta de declives da área de estudo calculada com base no MDT IGeoE por este não estar sujeito a erros de filtragem.

Nas zonas que se localizam dentro do perímetro urbano de 1944 e que não sofreram alterações significativas, pode-se confirmar que os aterros identificados nessas áreas coincidem com declives acentuados, confirmando a hipótese levantada anteriormente que o filtro usado para produzir o MDT Foto é muito sensível ao declive do terreno. Outra ilação que se pode retirar é que na zona norte do perímetro urbano, embora seja uma zona fortemente edificada como se pode verificar na Figura 63, não se verificam zonas erradamente identificadas como escavações. Isto acontece porque ao contrário do restante perímetro, nessa zona os declives são pequenos, na ordem dos 4.5°.

Conclui-se assim que o mapa de escavações elaborado é muito afectado por erros provocados por má filtragem do MDT Foto. Embora o MDT LiDAR também contribua para áreas erradamente identificadas, essas zonas para além de serem poucas, estão bem definidas.

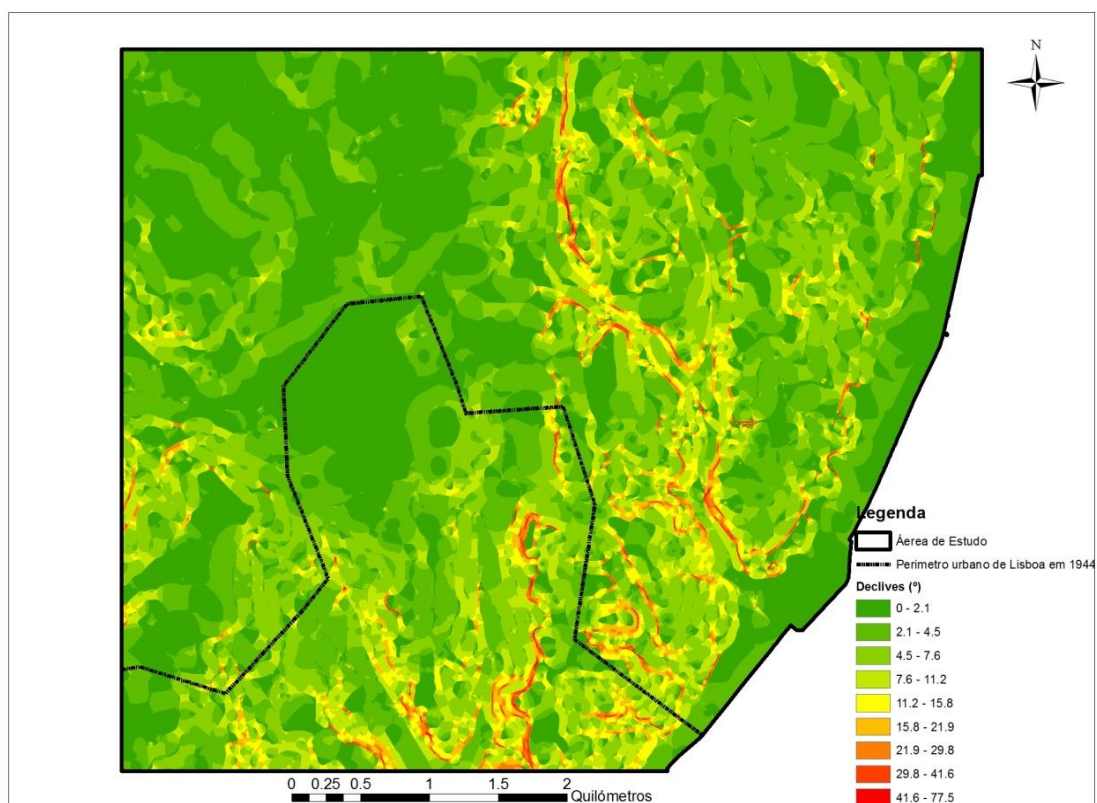


Figura 62 – Carta de declives da área de estudo calculada com base no MDT IGeoE.

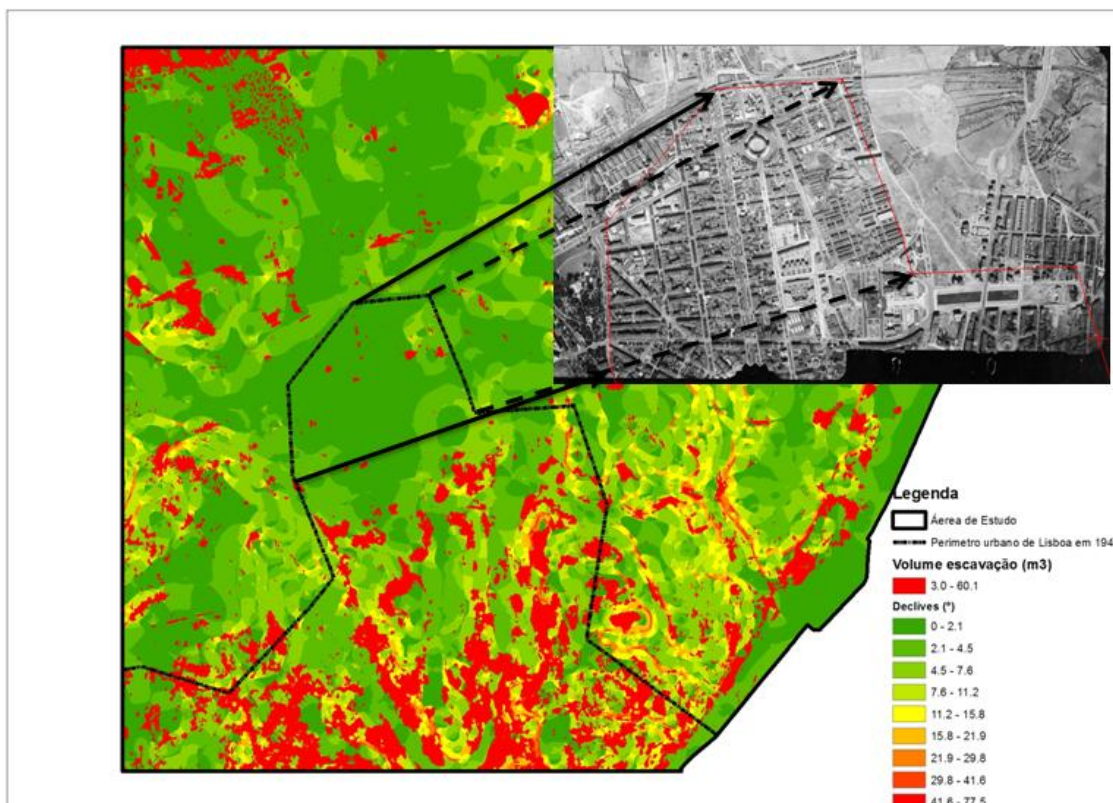


Figura 63 – Carta de declives da área de estudo e zonas de escavação identificadas. Estudo comparativo com zonas urbanizadas em 1944.

4.4 Validação de resultados

Concluída esta fase do trabalho, procedeu-se de seguida a uma validação dos resultados com o levantamento de aterros e escavações produzido em 1.1.4, Figura 64. Os resultados demonstraram ser consistentes, uma vez que, à excepção da zona delimitada anteriormente, visualmente todas as zonas de maiores aterros e escavações identificadas pelo método coincidem com as áreas determinadas por fotointerpretação. Para além de confirmar as zonas levantadas anteriormente, este método complementa-o ao identificar com precisão as zonas onde realmente ocorreram movimentações de terras, que tipo de movimentações e qual o seu volume.

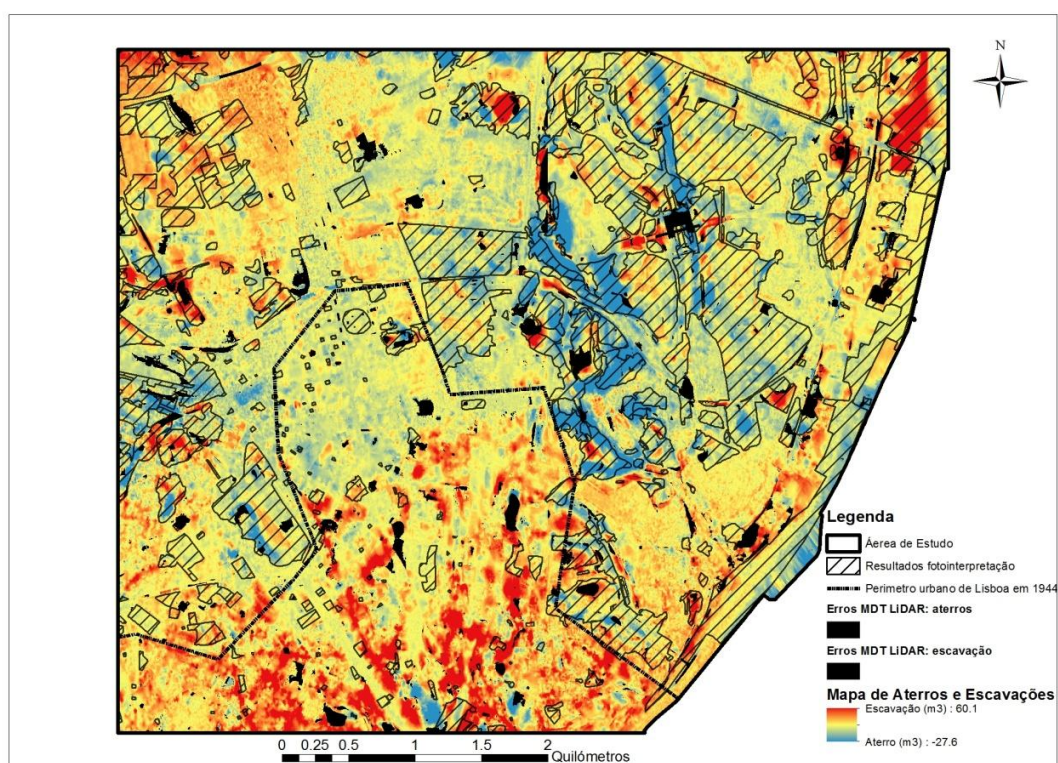


Figura 64 – Validação de carta de aterros e escavações com estudo baseado na fotointerpretação.

O mapa de aterros e escavações não foi medido directamente, foi calculado através da medição de duas grandezas de entrada (MDT LiDAR e MDT Foto), utilizando o modelo matemático expresso pela equação 37. Essas grandezas, como já foi referido anteriormente, foram obtidas por métodos diferentes que possuem incertezas associadas. As incertezas associadas a cada processo de obtenção do MDT contribuem para a determinação da incerteza combinada do mapa de aterros e escavações. Esta incerteza combinada pode ser determinada pelas leis especiais de propagação de variâncias para funções lineares, que é o caso, através da equação seguinte [Mendes, 2009]:

$$\sigma_Y^2 = a_1^2 \sigma_{x_1}^2 + a_2^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + a_n^2 \sigma_{x_n}^2 \quad (37)$$

Onde:

- σ_Y^2 : é a variância da mensuranda Y
- a_i : são coeficientes das grandezas de entrada
- σ_{x_i} : são as variâncias das grandezas de entrada

Aplicando a equação (37) com as variâncias das duas grandezas $\sigma_{MDT LiDAR}^2 = 0.35^2 m$ e $\sigma_{MDT Foto}^2 = 1.5^2 m$, a variância do mapa é $\sigma_{Mapa de aterros e escavações}^2 = 2.38 m$ e o desvio padrão é $\sigma_{Mapa de aterros e escavações} = 1.54 m$.

Calculada a incerteza deste mapa, produziu-se um mapa da Figura 65, onde estão representadas apenas as zonas de aterro e escavação para uma incerteza padrão de +/- 1,54m. Nessa figura é validado os resultados do método proposto, uma vez que à excepção da zona delimitada pelo perímetro urbano de Lisboa de 1944, as principais zonas de aterro e escavação encontram-se coincidentes com o levantamento por fotointerpretação.

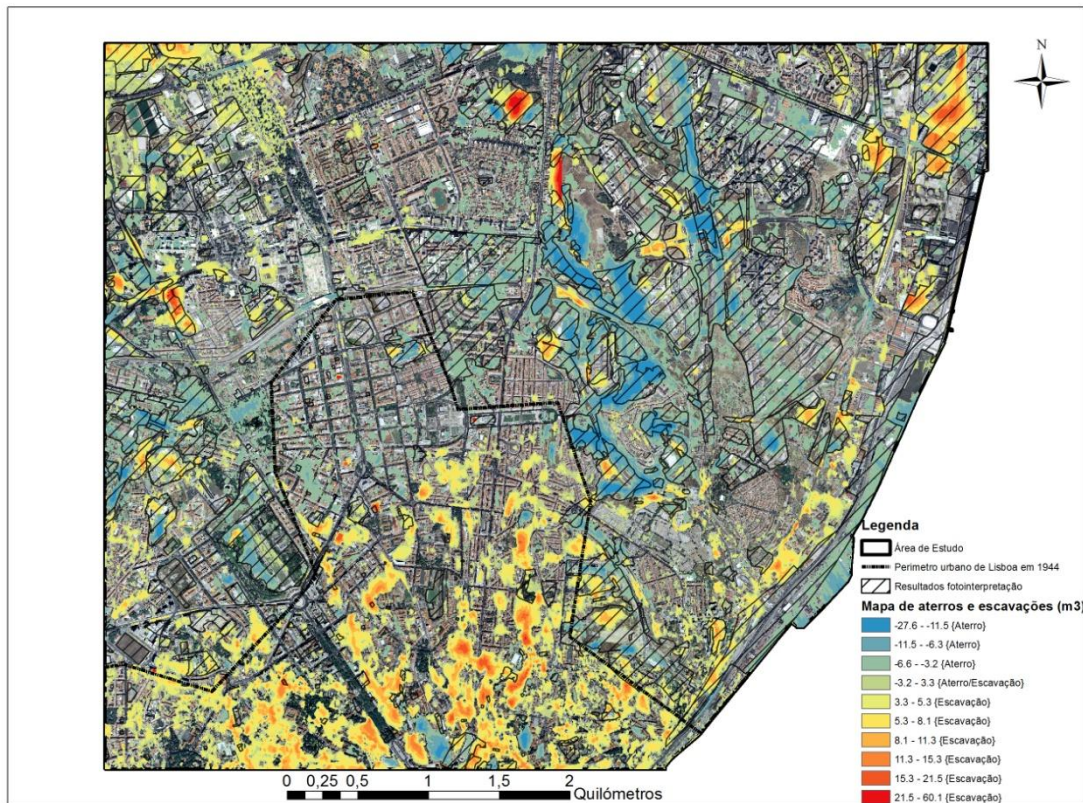


Figura 65 – Carta de aterros e escavações para $\sigma = 1.54 m$.

5 Conclusões

Nesta dissertação foi testada uma metodologia com vista a identificar e cartografar as zonas de aterros e escavações da cidade de Lisboa, com base em dados LiDAR de 2006 e fotografias aéreas antigas datadas de 1944, da mesma zona.

A carta de aterros e escavações é um importante contributo para a actualização da informação geológica oficial de Lisboa que, por sua vez, é utilizada na determinação das áreas de susceptibilidade de ocorrência de movimentos de massa em vertentes. Esta informação faz parte da planta de riscos naturais e antrópicos I, do mais importante instrumento de planeamento territorial do município, o PDM de Lisboa.

Foram identificadas várias técnicas de processamento digital de imagens para se produzir um MDT LiDAR, como filtros morfológicos, filtros por densificação sucessiva, filtros baseados em superfícies e filtros baseados em segmentação. Estudos comparativos realizados entre estes filtros demonstraram que, de forma geral, todos funcionam satisfatoriamente em áreas com pouca complexidade, como terreno com pouco declive, edifícios pequenos e vegetação esparsa. No entanto identificaram-se falhas de classificação em zonas de terreno com declive acentuado, em pontes e passagens desniveladas. Foram sugeridas combinações de várias categorias de algoritmos e a utilização de mais informação no processo de classificação, uma vez que apenas a informação geométrica se revelou ser insuficiente para caracterizar o terreno.

O método escolhido para produzir o MDT LiDAR, face à informação de base fornecida, foi a reconstrução morfológica baseada em dilatações geodésicas sucessivas. Este algoritmo tem por base duas categorias de filtros (morfológicos e baseados em segmentação) e apresenta como vantagens o facto de ser indiferente à escolha do elemento estruturante e de não necessitar de uma operação de filtragem nos resultados finais, principais limitações apontadas aos métodos morfológicos clássicos.

O conceito do método é a reconstrução morfológica que utiliza a dilatação geodésica. Como esta utiliza um elemento estruturante isotrópico elementar, não é necessário especificar o seu tamanho como noutros métodos morfológicos. Para além disso, ao executar a dilatação geodésica através de uma sequência de marcadores, os objectos “não terreno” com diferentes alturas são tidos em consideração. Dentro do processo sequencial do método, a classificação dos pixéis em “terreno” e “não terreno” é feita com a análise da variação local de alturas ao longo da fronteira das regiões

segmentadas. Isto corresponde a uma análise da descontinuidade tendo em consideração o declive na fronteira dos objectos.

O algoritmo foi implementado em Matlab® e foi melhorado posteriormente com uma operação de extracção de edifícios à priori. Este algoritmo consiste numa identificação da fronteira dos objectos com base em filtros derivativos de 2ª ordem e numa classificação dos objectos em “terreno” ou “não terreno” de acordo com a análise da variação local de alturas ao longo da fronteira.

A qualidade geral do MDT LiDAR obtido depende da qualidade da nuvem de pontos, da qualidade do processo de filtragem e da qualidade do processo de interpolação. Através de uma análise quantitativa obteve-se um desvio padrão de 35 cm. A avaliação qualitativa foi realizada com o auxílio de um modelo de terreno de referência não sujeito a erros de classificação, o MDT IGeoE. Da comparação entre os dois modelos identificaram-se alguns edifícios, pontes e viadutos que não foram extraídos dos dados iniciais e também algumas zonas de terreno, que devido ao seu declive natural, foram classificadas como regiões “não terreno”. A análise global foi francamente positiva, validando-se a utilização do MDT LiDAR para o estudo a realizar.

O MDT Foto, foi produzido no Photomod® através do método de correspondência automática de imagens. Este método utiliza o coeficiente de correlação normalizado para determinar pontos homólogos em pares estereoscópicos e produzir a amostra primária de pontos cotados. Uma vez que se detectaram falhas na orientação espacial das fotografias aéreas, passo fundamental para se aplicar a técnica supracitada, foi necessário recalcular as orientações espaciais das mesmas. Foi calculada uma ATA, obtendo-se uma precisão geral de ajustamento (σ_0) de 1.032 e um desvio máximo nos pontos de controlo de 1,16 metros.

O processo de filtragem da nuvem de pontos obtida foi realizado com recurso a uma função disponibilizada pelo Photomod®, cujo conceito de funcionamento assenta no ângulo de declive máximo entre dois pontos ou entre um ponto e uma superfície. Após a aplicação desta função, verificou-se que nas zonas densamente urbanas, nomeadamente no centro histórico da cidade com ruas muito estreitas, o processo automático de filtragem não funcionou adequadamente, mantendo-se muitos pontos medidos no topo de edifícios. A filtragem automática foi então completada com uma edição manual dos pontos, de forma a minimizar essas lacunas e erros. No entanto, na zona histórica as ruas estavam quase completamente à sombra dificultando a medição manual de pontos ao nível do terreno. Essa foi também a razão de não haver

pontos bons detectados pelos operadores automáticos nesta zona. Entre medições automáticas e manuais, foram colhidos 256892 pontos.

O método de interpolação utilizado posteriormente para produzir o MDT Foto foi o kriging ordinário, cujo interpolador foi modelado com remoção de tendência espacial de 2ª ordem e com anisotropia. Este interpolador probabilístico, modelado com estas parametrizações, obteve melhores resultados que o interpolador determinístico IDW, apresentando o menor RMS.

A identificação com precisão das zonas de aterro e escavação foi obtida através da comparação entre os MDT produzidos por técnicas diferentes. Foram identificados pixels na área de estudo que representam diferenças volumétricas em coluna que oscilam entre os 60.1 m³ (em escavações) e os 27.6 m³ (em aterros), para o período temporal em estudo.

Da análise realizada sobre a qualidade dos mapas gerados, concluiu-se que os erros presentes no MDT LiDAR são pouco significativos para as zonas erradamente classificadas como de aterro e escavação e estão bem sinalizados.

Relativamente ao MDT Foto, concluiu-se que os erros de filtragem têm bastante influência nas zonas de escavação identificadas. Verifica-se que a maior parte das zonas identificadas como de escavação se localizam dentro do perímetro urbano de 1944, e que, coincidem com as zonas de maior declive.

O mapa de aterros e escavações foi validado com um trabalho feito num período semelhante por fotointerpretação sendo possível concluir que, à excepção da zona delimitada anteriormente, para uma incerteza de ± 1.54 m as zonas de aterro e escavação identificadas coincidem com o levantamento realizado.

De uma forma geral, esta dissertação permite dar uma contribuição efectiva para o conhecimento existente sobre a evolução das alterações antrópicas realizadas na área de estudo durante o período de estudo. Foram identificadas zonas de aterro e escavação de forma independente da escala das fotografias e do operador que a efectua, foram determinados para cada pixel qual o volume de solos movido e foram identificados os erros existentes nessa cartografia, assim como as precisões associadas a cada ferramenta que lhe deu origem.

Conclui-se que não é exequível utilizar esta metodologia numa área de estudo desta dimensão, porque o tempo de processamento do algoritmo de filtragem utilizado na

elaboração do MDT LiDAR excedeu os 65 dias. Uma optimização das rotinas do algoritmo utilizado poderia trazer vantagens na velocidade de processamento.

Como perspectivas futuras de melhoria desde trabalho, aponta-se a necessidade de se optimizar o algoritmo de classificação utilizado para tratar os dados LiDAR e a necessidade de se melhorar o processo de filtragem da amostra de pontos produzida por correspondência automática de imagens, uma vez que foi a principal fonte de erros nos resultados finais desta dissertação.

Referências

- Ahokas, K. e Hyypä, J. (2003) "A quality assesment of airborne laser scanner data." IAPRS, XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany.
- Arefi, H., Hahn, M. (2005) "A morphological reconstruction algorithm for separating off-terrain points in laser scanning data." Proceedings of the ISPRS Workshop Laser-Scanning, Enschede, Holand.
- Arefi, H., Engels, J., Hahn, M., Mayer, H. (2007) "Automatic DTM generation from laser scanning data in residential hilly area." ISPRS, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36(3/W19).
- Arefi, H., Angelo, P., Mayer, H., Reinartz, P. (2010) "Automatic generation of DTM from Cartosat-1 stereo images." ISPRS, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Comission I, WG4.
- Artuso, R., Bovet, S., Streilein, A. (2003) "Practical methods for the verification of countrywide produced terrain and surface models." IAPRS, XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany.
- Axelsson, P. (1999) "Processing of laser scanner data algorithms and applications." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 138-147.
- Beraldin, J., Blais, F., Lohr, U. (2010). "Laser scanning technology." In G. Vosselman, and H. Maas (Eds.), Airborne and Terrestrial Laser Scanning, CRC Press, pp.1-39
- Brenner, C. (2010) "Building Extraction" In G. Vosselman, and H. Maas (Eds.), Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC Press, pp. 169-212.
- Briese, C. (2010) "Extraction of digital terrain models." In G. Vosselman, and H. Maas (Eds.), Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC Press, pp. 147-150.
- Brügelmann, R. e Bollweg, A. (2004) "Laser altimetry for river management." IAPRS, XXXV/B2, Istanbul, Turkey.
- Catita, C. M. (2012) "Análise Espacial da Informação Geográfica", apontamentos das aulas de análise espacial da informação geográfica, texto não publicado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- DGT (2013): <http://www.igeo.pt/Frameset-produtos.htm>, acedido em Julho de 2013.
- Dias, R. (2010) "Riscos Geológicos e Geologia Urbana." LNEG, Lisboa, Portugal, 24 Setembro.

- DISASTER (2012) “Perfil do Concelho de Lisboa.” Projecto DISASTER – Desastres naturais de origem hidro-geomorfológica em Portugal: base de dados SIG para apoio à decisão no ordenamento do território e planeamento de emergência (PTDC/CS-GEO/103231/2008). Versão Setembro 2012, Lisboa.
- ESRI (2013): <http://blogdoarcgis.blogspot.pt/2008/12/introduo-ao-arcgis-caracteristicas.html>, acedido em Julho de 2013.
- Ferreira, A.N. (2009) “Cadastro e Ordenamento do Território”, apontamentos das aulas de Cadastro e Ordenamento do Território, texto não publicado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- GoogleMaps (2013): <https://maps.google.pt/maps?hl=pt-PT&q=goo>, acedido em Julho de 2013.
- Heipke, C. (1996) “Overview of Image Matching Techniques”, OEEPE - Workshop on the application of digital photogrammetric workstations, Lausanne, Switzerland.
- Jazayeri, I. e Fraser, C.S. (2008) “Interest operators in close-range object reconstruction.” ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 37, pp. 69–74.
- Karabork, H., Yildiz, F., Coskun, E., Yilmaz, H.M., Yakar, M. (2004) “Investigation of accuracy for digital elevation models generated with different methods in photogrammetry”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 35, pp. 156-162.
- Kraus, K., Pfeifer, N. (1998) “Determination of terrain models in wooded areas with airborne scanner data.” ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53, pp. 193-203.
- Kilian, J., Haala, N., Englich, M. (1996) “Capture and evaluation of airborne laser scanning data.” ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.XXXI, B3, Vienna, Austria.
- Lillesand, T.M. e Kiefer, R.W. (2000) “Remote sensing and image interpretation.” 4th ed. New York: John Wiley & Sons, p.724.
- Marques, A.M.G. (2009) “Recuperação radio-geométrica e catalogação digital de coberturas aéreas antigas da zona de Lisboa”, Tese de Mestrado.
- Mateus, A. (Coord) (2008) “Desastres Naturais: Minimizar os riscos, maximizar a consciencialização.”, GeoFCUL, Lisboa, Portugal, Março.

- Matlab (2013a): <http://www.mathworks.com/help/images/morphological-reconstruction.html>, acedido em Julho de 2013.
- Matlab (2013b): http://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html, acedido em Julho de 2013.
- Matos, J. (2008) "Fundamentos de Informação Geográfica". Ed. LIDEL – Edições técnicas, 5ª edição, Lisboa, 2008.
- Mendes, V. B e M. A. Silva (1996). "Normas de referenciação bibliográfica para o Curso de engenharia geográfica", Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Mendes, V. B. (2009). "Instrumentação e Metrologia – versão 2.0", apontamentos das Instrumentação e Metrologia, texto não publicado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Meng, X., Currit, N. Zhao, K, (2010) "Ground Filtering Algorithms for airborne LiDAR data: a Review of critical issues.", Journal Remote Sensing, 2, pp 833-860.
- NASA (2013): <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/instr.htm>, acedido em Julho 2013.
- Pfeifer, N. e Mandlbürger, G. (2008) "LiDAR Data Filtering and DTM Generation." In J. Shan and C. Toth (Eds.), Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. CRC Press. pp. 307-333.
- Photomod (2011) "Manual do utilizador – versão 5.21".
- PNPOT (2007) Relatório anexo à Lei nº58/2007, de 4 de Setembro, que aprova o Programa Nacional da política de Ordenamento do Território (PNPOT), rectificado pelas declarações nº80-A, de Setembro de 2007 e nº103-A/2007, de 2 de Novembro de 2007.
- Ramos, C., Zêzere, J.L., Mendonça, J.L. (2010) "Reserva Ecológica Nacional da Área Metropolitana de Lisboa – Quadro de Referência Regional". Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo, Lisboa.
- Redweik, P. (2010) "Fotogrametria Aérea", apontamentos das aulas de Fotogrametria Aérea, texto não publicado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Redweik, P., Catita, C., Brito, M.C. (2011) "3D Local Scale Solar Radiation Model Based on Urban LiDAR Data". ISPRS, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.38 (4/ WG19), pp. 265-269.

- Redweik, P. (2011) “Fotogrametria Terrestre”, apontamentos das aulas de Fotogrametria Terrestre, texto não publicado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Redweik, P., Lobos, L.V., Filipe, J., Gonçalves, J.A. (2012) “Recuperação de paisagens submersas a partir de fotografia aérea histórica.”, Boletim do Instituto Geográfico do Exército, 74, pp. 30-35.
- Redweik, P. (2012) “Produção Cartográfica”, apontamentos das aulas de Produção Cartográfica, texto não publicado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Santos, F.D., Forbes, K., Moita, R. (Eds.), (2001) “Mudança Climática em Portugal. Cenários, Impactes e Medidas de Adaptação – SIAM.” Sumário Executivo e Conclusões, Gradiva, Lisboa.
- Sithole, G. (2001) “Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter.” IAPRS, XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, pp. 203-210.
- Sithole, G. e Vosselman, G. (2004) “Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds.” ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 59 (3-4), pp. 202–224.
- Soares, F. (2011) “Processamento Digital de Imagem”, apontamentos das aulas de processamento digital de imagem, texto não publicado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Tóvári, D., Pfeifer, N. (2005) “Segmentation Based Robust Interpolation – A new approach to laser data filtering.” Proceedings of the ISPRS Workshop Laser-Scanning, Enschede, Holand, pp. 79-84.
- Vasconcelos, M. e Marques, F. (2010) “Cartografia tridimensional de aterros e escavações no concelho de Lisboa”. GEOTIC – Sociedade Geológica de Portugal, Évora, Revista Electrónica de Ciência da Terra, Volume 22 – nº15, pp. 1-4.
- Vasconcelos, M.A.D.F. (2011) “Cartografia de Susceptibilidade a Ocorrência de Movimentos de Vertente em Contexto Urbano: O Concelho de Lisboa”, Tese de Mestrado.
- Vasconcelos, M. e Marques, F. (2011) “Susceptibilidade à Ocorrência de Movimentos de Vertente em Lisboa.”, FCT, Lisboa, Portugal, 04 Maio.

- Vincent, L. (1993) "Morphological grayscale reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms." IEEE Transactions on Image Processing, Vol2, Nº2, pp. 176-201.
- Vosselman, G. (2000) "Slope based filtering of laser altimetry data." IAPRS, Vol. XXXIV Part B3, Amesterdão, Holand. pp. 935-942.
- Wikipédia, (2013a): http://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_morphology, acedido em Junho de 2013.
- Wikipédia, (2013b): http://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear_interpolation, acedido em Junho de 2013.
- Wack, R., Wimmer, A., (2002) "Digital Terrain Models From Airborne Laser Scanner Data – A Grid Based Approach." IAPRS, Vol XXXIV Part 3B. ISPRS Commission III, Simpósio. Setembro 9 - 13, Graz, Áustria. pp. 293-296.
- Zêzere, J.L., Pereira, S., Quaresma, I., Santos, P., Santos, M. (2013) "Desastres de origem Hidro-Geomorfológica em Portugal continental no período 1865-2010", Actas do VI Congresso Nacional de Geomorfologia, Coimbra, pp. 124-127.
- Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J., Zhang, C.(2003) "A Progressive Morphological Filter for Removing Non-Ground Measurements from Airborne LIDAR Data." IEEETrans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, Issue 4, pp. 872-882.

Anexo A – Perfil do concelho de Lisboa: Cheias/inundações e movimentos de massa em vertentes, período 1865-2010.

